

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA  
VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL  
DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ –  
CHUPA – PUNO”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**YUNIOR JOSÉ HUANCOILLO HUMPIRI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA CIVIL

“MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y  
CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA  
CARRETERA DESVIO HUANCANÉ – CHUPA – PUNO”

PRESENTADA POR:

Bach. YUNIOR JOSÉ HUANCOILLO HUMPIRI  
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO CIVIL



FECHA DE SUSTENTACION: 29 DE DICIEMBRE DEL 2017

APROBADA POR:

PRESIDENTE:

ING. JOSE LUIS COTIPA ARAPA

PRIMER MIEMBRO:

ING. NESTOR ELOY GONZALES SUCASAIRE

SEGUNDO MIEMBRO:

ING. GLENY ZOILA DE LA RIVA TAPIA

DIRECTOR / ASESOR:

DR. SAMUEL HUAQUISTO CACERES

Área : Transportes

Tema : Estabilización de suelos

Línea de investigación: Geotecnia

**DEDICATORIA****DEDICADO A:****Dios**

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado vida y salud para lograr mis objetivos.

**Mis Padres**

José Huancoillo Ticona y Lucila Humpiri Cahuari por estar toda mi vida a mi lado brindándome su apoyo incondicional, sus consejos y valores que me ha permitido ser una persona de bien, y dándome a cada instante una palabra de aliento para llegar a culminar mi profesión.

**Mi Hijo**

Josue Dalessandro Huancoillo Aruhuanca por ser el motor y motivo para superarme cada día más.

## AGRADECIMIENTOS

Para poder realizar ésta tesis de la mejor manera posible fue necesaria del apoyo de muchas personas a las cuales quiero agradecer. En primer lugar a mis padres, quienes han sido un apoyo moral y económico para lograr éste fin. Gracias por su paciencia. A mi director de tesis Dr. Samuel Huaquisto Cáceres, a los miembros del jurado Ing. José Luis Cutipa Arapa, Ing. Néstor Eloy Gonzales Sucasaire, Ing. Gleny Zoila De La Riva tapia y a todos los docentes de la E. P. Ingeniería Civil de la UNA-PUNO, donde ellos supieron guiarnos con su inteligencia y conocimiento. Gracias por facilitarme las cosas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
RESUMEN.....	12
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUCCIÓN .....	14
1.1    Análisis de la situación problemática.....	15
1.2.    Formulación del problema.....	16
1.2.1 Problema General.....	16
1.2.2 Problemas Específicos .....	16
1.3    Objetivo general .....	17
1.3.1    Objetivos Específicos.....	17
1.4 Hipótesis.....	17
1.4.1 Hipótesis Específicas .....	17
CAPÍTULO II.....	18
REVISIÓN DE LITERATURA .....	18
2.1 Ceniza Volante de Carbón.....	18
2.2 Aplicación de la Ceniza Volante.....	19
2.3. Suelo .....	31
2.3.1 El suelo y su origen.....	31
2.3.2. Principales tipos de suelos.....	32
2.3.3. Plasticidad de los suelos .....	33
2.3.4. Clasificación de los suelos .....	34
2.3.4.1. Sistema AASHTO M-145.....	35
2.3.4.2. Sistema unificado de clasificación de suelos USCS .....	37
2.3.5. Compactación de los suelos.....	43
2.3.5.1. Prueba de Proctor.....	43
2.3.5.2. Valor relativo de soporte-ensayo de C.B.R.....	44
2.3.2 Estabilización de Suelos .....	45
2.3.7.1    Propiedades geotécnicas que se mejoran. ....	47

2.3.3 Estabilización Química .....	47
2.3.4 Estabilización con Cal y Ceniza Volante .....	49
2.3.4.1 Agentes Estabilizantes.....	52
2.3.5 Cal.....	53
2.3.5.1 Generalidades sobre la cal .....	53
2.3.5.2 Los diferentes tipos de cal .....	53
2.3.5.3. Cales aéreas.....	53
2.3.5.4. Cales hidráulicas.....	54
2.3.5.5. Cales utilizadas para la estabilización de suelos .....	54
2.3.5.6. La cal como solución.....	55
2.3.5.7. Acción sobre los suelos arcillosos.....	56
2.3.6 Origen y Proceso de Obtención de Ceniza Volante.....	57
2.3.7 Ceniza Volante.....	63
2.3.8 Clasificación de Ceniza Volante .....	64
2.3.9 Propiedades de la Ceniza Volante .....	65
2.3.10 Carreteras no Pavimentadas .....	67
2.3.10.1. Clasificación de acuerdo a la demanda .....	68
2.3.10.2 Requisitos mínimos para afirmado .....	70
2.3.10.3 De la SubBase Granular.....	71
2.3.11 Características Climáticas en la Zona de Estudio.....	72
2.3.12 Diseño del Pavimento .....	72
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>75</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>75</b>
<b>3.1 Materiales Investigados .....</b>	<b>75</b>
3.1.1 Material de cantera .....	75
3.1.2 Ceniza Volante.....	76
3.1.3 La Cal.....	78
3.1.4 Mezcla de Suelo Arcilloso y Ceniza Volante.....	80
<b>3.2 Ensayos de Laboratorio a Realizar .....</b>	<b>82</b>
3.2.1 Ensayos físicos .....	82
A. Contenido de Humedad.....	82
B. Análisis Granulométrico por Tamizado.....	83

C. Limite Líquido .....	85
D. Limite Plástico .....	86
3.2.2 Ensayos Mecánicos .....	87
A. Proctor modificad .....	87
B. PRENSA C.B.R.....	88
CAPÍTULO IV .....	90
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	90
4.1 Resultado de la Clasificación de Suelos .....	90
4.1.1 Granulometría .....	90
4.2 Resultado de las Propiedades Índice de Plasticidad y Expansión.....	92
4.2.1. Límites de Atterberg .....	92
4.2.2 Expansión.....	94
4.3 Resultado de las Propiedades Densidad Seca Máxima y Valor de Soporte Relativo .95	
4.3.1 Ensayo de Compactación (Próctor Modificado) .....	95
4.3.2 Ensayo CBR.....	97
4.4 Comparación del suelo sin estabilizar y estabilizado .....	100
CAPÍTULO V .....	102
CONCLUSIONES .....	102
CAPÍTULO VI .....	103
RECOMENDACIONES.....	103
CAPÍTULO VII.....	104
REFERENCIAS .....	104
ANEXOS .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Resistencia a compresión a edades de 1 día y 3 días .....	21
Figura 2: Resistencia a compresión a edades de 7 día y 28 días .....	21
Figura 3: Cenizas de carbón y molida .....	22
Figura 4: Curva de CBR de Mezcla con Cemento 3% vs. Contenido de Ceniza Volante. .....	24
Figura 5: Distribución de Partículas de Mezclas de Suelo Cal y Suelo Cemento .....	29
Figura 6: Limites de Atterberg vs Contenidos de Estabilizadores.....	29
Figura 7: %CBR y % Expansión del CBR vs. Contenido de Estabilizadores .....	30
Figura 8: UCS a) Modulo Tangente Inicial b) Mezclas de Limo, Cemento, después de 7 y 28 Días de Curado.....	31
Figura 9: Carta de Plasticidad .....	39
Figura 10: Principios de Compactación.....	43
Figura 11 Proceso de Obtención de Carbón Pulverizado .....	59
Figura 12 Vista General de la Central Termoeléctrica ILO21 .....	62
Figura 13 Vista Interior de las Instalaciones de Central Termoeléctrica ILO2 .....	62
Figura 14 Vista de los Silos donde se Almacena la Ceniza Volante .....	63
Figura 15 Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008) .....	73
Figura 16 Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento .....	74
Figura 17 Visita del lugar de obtención de arcilla en la Cantera Yanahoco.....	76
Figura 18 Visita a la central Termoeléctrica Ilo 21 .....	77
Figura 19: Ceniza Volante .....	77
Figura 20 Muestra de Cal.....	80
Figura 21 Mescla de suelo, ceniza volante y cal.....	81
Figura 22: Secado de la muestra .....	83
Figura 23: Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado.....	84
Figura 24: Ensayo de Limite Liquido con la Copa de Casagrande.....	85
Figura 25: Ensayo de Limite Plástico .....	86
Figura 26: Equipo para el Ensayo Proctor .....	88
Figura 27: Lectura de la Expansión, Prensa C.B.R .....	89
Figura 28 Lavado de muestra de la cantera Yanahoco .....	90
Figura 29 Curva granulometría, muestra de la Cantera Yanahoco.....	92

Figura 30: Ensayo de LL para las diferentes proporciones de ceniza volante y cal 5% (cte.).....	92
Figura 31: Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de C. V. y Cal 5% (cte.).....	93
Figura 32 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de C.V. y Cal 5% (cte.) .....	94
Figura 33: Variación de la Expansión en la Mezcla con Adición de Cal 5% (cte.) y Contenido de Ceniza Volante .....	95
Figura 34: Combinación de Suelo, C.V. y Cal 5% (cte) para la compactación de la muestra.....	96
Figura 35: Variación de la M.D.S. con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla, C.V. y Cal 5% (cte.).....	97
Figura 36: Lectura del deformímetro.....	98
Figura 37: Ensayo de CBR .....	98
Figura 38: Variación CBR entre Suelo Arcilloso, C.V. y Cal 5% (cte.).....	99

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Resultado del CBR al 100 % con Ceniza Volante Y Cemento 3%.....	24
Tabla 2: Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiado.....	26
Tabla 3: Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiados .....	27
Tabla 4: Sistema de Clasificación AASHTO.....	37
Tabla 5: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	42
Tabla 6: Valores de Carga Unitaria .....	45
Tabla 7: Efectividad de los agentes estabilizadores.....	49
Tabla 8: Guía Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador .....	52
Tabla 9 Requerimientos Químicos de Ceniza Volante de acuerdo a ASTM C 618 .....	65
Tabla 10: Clasificación de carreteras según su función.....	68
Tabla 11: Requerimientos mínimos a nivel de afirmado .....	70
Tabla 12 Carbones Utilizados en la C.T. ILO21 .....	78
Tabla 13 Proporción de Mezcla y Símbolos Referentes a cada Material. ....	80
Tabla 14: Tipo y Tamaño de Partículas .....	84
Tabla 15: Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales.....	87
Tabla 16: Gradación granulométrica del material de cantera Yanahoco. ....	91
Tabla 17: Resultados de Límites de Consistencia. ....	93
Tabla 18: Resultados de la Expansión de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso, C. V. y Cal 5% (cte).....	94
Tabla 19: Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Suelos y combinación con C.V. y Cal 5% .....	96
Tabla 20: Resultados del Ensayo de CBR entre Suelo Arcilloso, C.V. y Cal 5% (cte.).	99

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

AASHTO	: American Association of State Highway and Transport Oficial
ASTM	: American Society for Testing and Materials
L. L.	: Limite Líquido
L. P.	: Límite Plástico
I. P.	: Índice de Plasticidad
D. M. S.	: Densidad Seca Máxima
Dv.	: Desvío
CV	: Ceniza Volante
M	: metro
Mva	: Mega vatio
MWh	: Megavatio hora
Na	: Sodio
O	: Oxígeno
S	: Azufre
Si	: Silicio
T	: Tonelada

## RESUMEN

Algunos suelos arcillosos, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos de pavimentación. La ceniza volante es un residuo que proviene de la planta termoeléctrica ubicada en Ilo, Moquegua, la disposición de éste genera un problema ambiental. Esta investigación, analizo los parámetros físicos-mecánicos y costo de aplicación que produce la adición de cenizas volante de carbón y cal en un suelo arcilloso, dicho material conformará la base de la carretera no pavimentada, mejorando su resistencia y estabilidad volumétrica. Las propiedades físicas y mecánicas aquí analizadas son el limite líquido, limite plástico, expansión, densidad seca máxima del proctor modificado y valor de soporte relativo (CBR). Se comprueba que el suelo arcilloso con la adición de ceniza volante y cal en diferentes concentraciones presenta un mejor comportamiento que el suelo puro para su uso en la conformación de afirmados. Cumpliendo de esta manera las especificaciones Técnicas exigidas por las normas peruanas (EG-2013). La investigación concluye que existe viabilidad técnica y económica para la construcción de pavimentos empleando cenizas volantes de carbón como material estabilizador de suelos.

**Palabras Clave:** Estabilización de suelo, ceniza volante, compactación

**ABSTRACT**

Some clayey soils, due to their low support capacity and poor quality, do not always meet the necessary requirements to be used in paving projects. The fly ash is a waste that comes from the thermoelectric plant located in Ilo, Moquegua, the disposition of which generates an environmental problem. This research, analyzed the physical-mechanical parameters and application cost produced by the addition of coal fly ash and lime in a clayey soil, this material will form the base of the unpaved road, improving its strength and volumetric stability. The physical and mechanical properties analyzed here are the liquid limit, plastic limit, expansion, maximum dry density of the modified proctor and relative support value (CBR). It is verified that the clayey soil with the addition of fly ash and lime in different concentrations presents a better behavior than the pure soil for its use in the conformation of affirmed ones. Fulfilling in this way the Technical specifications required by Peruvian standards (EG-2013). The research concludes that there is technical and economic feasibility for the construction of pavements using coal fly ash as soil stabilizer material.

Palabras Clave: Soil stabilization, fly ash, compaction

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

Algunos suelos arcillosos, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos de pavimentación. Una alternativa de solución es mejorar las características mecánicas del material, estabilizándolo con productos químicos. Los pavimentos de carreteras que se construyen sobre suelo de baja capacidad de soporte, presentan un elevado costo porque su diseño demanda mayores espesores. Luego su vida útil disminuye por problemas de hundimientos o asentamientos. En diversos países como Estados Unidos, Europa y Colombia se han empleado cenizas de carbón como material de pavimentación, obteniendo como resultado que estabiliza el suelo mejorando sus propiedades mecánicas (Pérez Roció, 2012 p. 17). Un problema adicional, en zona de selva, es el escaso número de canteras de material granular, que justifican realizar trabajos de estabilización de suelos.

En el presente trabajo de investigación realiza una comparación entre los valores de resistencia mecánica de los suelos (C.B.R), Plasticidad y expansión de suelo convencional y suelo estabilizado con ceniza volante y cal en la carretera no pavimentada que se tiene actualmente en la vía Desvío Huancané – Chupa

Las plantas termoeléctricas, como la ubicada en la provincia de Ilo, utilizan carbón mineral bituminoso como fuente de calor y que producen cenizas y escorias como residuo de su proceso industrial, podrán ser usadas en pavimentos, tal como sucede en otros países.

La presente tesis evalúa el comportamiento de un suelo arcilloso con la adición de ceniza volante y cal en diferentes concentraciones.

Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo reduciendo el índice de expansión y mejorando la capacidad de soporte.

La presente investigación contribuye con la interpretación del comportamiento de los suelos estabilizados con ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica y cal, potenciando el conocimiento y su utilización en obras de pavimentación de carreteras.

En el Capítulo I introducción, sección del trabajo donde se realizó el planteamiento y formulación del problema, justificación de la investigación, objetivos de la investigación, así como de la hipótesis que será demostrada.

En el Capítulo II Revisión de Literatura, sección de trabajo donde se consideró investigaciones anteriores que sirvieron de base para la presente investigación; el marco teórico, donde reside toda la teoría necesaria para el mejor entendimiento del presente trabajo de investigación; y finalmente el marco conceptual, necesario para comprender los términos básicos más utilizados a lo largo de la investigación.

En el Capítulo III Materiales y Métodos, sección donde se describe con detalle el material experimental utilizado en la investigación. Así mismo, los métodos materiales y técnicas empleados para cada uno de los objetivos.

En el Capítulo IV resultados y discusión, exposición y análisis de los resultados obtenidos, como también las correlaciones respectivas y la prueba de hipótesis.

En el Capítulo V Conclusiones a las que se ha llegado como resultado de la presente investigación validando la hipótesis planteada

En el Capítulo VI Recomendaciones, Se presentan las recomendaciones y sugerencias para seguir investigando e implementando trabajos relacionados a la estabilización de suelos con cenizas volantes

En el Capítulo VII la Bibliografía correspondiente.

En el Capítulo VIII Anexos respectivos.

### **1.1 Análisis de la situación problemática**

La mala compactación, el tipo y la mala gradación granulométrica del suelo que conforma la base de una carretera no pavimentada, causa diferentes fallas en la superficie de rodadura, motivo por lo que se presenta esta investigación en la cual se realizará la adición de Ceniza Volante y cal, para así poder dar una solución técnica y económica al problema de compactación de la base de la carretera no pavimentada que se tiene actualmente en la vía Desvío Huancané - Chupa, con lo cual se mejorará la transitabilidad entre Chupa,

Huancané, Huatasani, Juliaca, y viceversa, además de permitir el desarrollo socioeconómico y mejorar la calidad de vida de los pobladores que se encuentran asentados en las márgenes de la carretera y la misma capital del distrito.

Para dar solución a este problema se emplean alternativas de estabilización para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra.

La vida útil de los pavimentos, que descansan sobre suelos blandos es menor que el promedio de la mayoría, pues se producen hundimientos o asentamientos que deterioran rápidamente la vía.

La zona de selva se caracteriza porque no existen canteras de material granular adecuado que puedan emplearse en las diversas capas de la estructura del pavimento.

En la estabilización de suelos los procesos constructivos no requieren de equipos especiales, aunque en la actualidad existen equipo que pueden acelerar el mezclado, la inyección de cal hidratada, la humectación y el compactado parcial.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema General**

¿Cuáles son las ventajas de las propiedades mecánicas y costo de aplicación con el uso de la Ceniza Volante en la estabilización de la base de la carretera no pavimentada Dv Huancané - Chupa?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

¿El uso de la CENIZA VOLANTE permitirá mejorar las propiedades índice de plasticidad y expansión en la estabilización de la base de la carretera no pavimentada Dv Huancané - Chupa?

¿El uso de la CENIZA VOLANTE permitirá mejorar las propiedades densidad seca máxima y valor de soporte relativo en la estabilización de la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané - Chupa?

### 1.3 Objetivo general

- Analizar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con el uso de CENIZA VOLANTE Y CAL que conforma la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané – Chupa

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades índice de plasticidad y expansión del suelo estabilizado con CENIZA VOLANTE Y CAL de la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané –Chupa.
- Determinar las propiedades densidad seca máxima y valor de soporte relativo del suelo estabilizado con el uso de CENIZA VOLANTE Y CAL de la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané –Chupa.
- Realizar la comparación respecto al suelo sin estabilizar y estabilizado

### 1.4 Hipótesis

- Las propiedades del suelo estabilizado con CENIZA VOLANTE Y CAL mejoran significativamente por lo que es viable su uso como material para pavimento a nivel de afirmado en la carretera no pavimentada Dv. Huancané – Chupa.

#### 1.4.1 Hipótesis Específicas

- Las propiedades índice de plasticidad y expansión son aceptables del suelo estabilizado con CENIZA VOLANTE Y CAL de la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané –Chupa.
- Las propiedades densidad seca máxima y valor de soporte relativo mejoran con la adición de CENIZA VOLANTE Y CAL de la base de la carretera no pavimentada Dv. Huancané –Chupa.
- El suelo estabilizado con ceniza volante y cal presenta mejores propiedades físicas respecto al suelo sin estabilizar

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

La información relativa a la clasificación, las aplicaciones y los procesos para la obtención de cenizas volantes y algunas estadísticas sobre su utilización.

El estudio de las cenizas volantes, en países desarrollados alcanza en los últimos años un gran auge debido al crecimiento registrado en la producción de energía eléctrica vía carbón. La generación de residuos, tales como la ceniza volante se ha convertido en un problema ambiental, motivando un especial interés de estudiar su aprovechamiento en la ingeniería civil, minimizando el impacto que genera su producción.

La planta termoeléctrica Ilo 21, ubicada en la provincia de Ilo, utiliza el carbón como fuente de calor, produciendo cenizas y escorias en su proceso industrial. Estos residuos generan un problema ambiental, al ser dispuestos en rellenos sanitarios acondicionados, demandando espacio y generando costos, sin contemplar aplicación alguna que equilibre el excedente de ceniza con técnicas innovadoras.

#### 2.1 Ceniza Volante de Carbón

Las restricciones en el suministro de primeras materias energéticas surgidas a partir de los años 70, pusieron de manifiesto, en casi todas las áreas geográficas, la necesidad de evitar la dependencia del petróleo en la producción de energía eléctrica. En la década comprendida entre 1975 y 1985 el uso del carbón se duplicó en la mayoría de los países desarrollados (Pérez, 2012).

Umaña Peña (2002), expresa que la combustión del carbón para generar energía eléctrica produce fundamentalmente dos tipos de residuos sólidos: Las cenizas volantes, obtenidas por precipitación electrostática o mecánica del polvo suspendido en los gases de la combustión y las cenizas de hogar o escoria, que caen al fondo por gravedad y que se diferencian de las primeras principalmente por el tamaño de partícula. La producción de cenizas volantes supera a las cenizas de hogar alcanzando valores de hasta un 80% del total de cenizas generadas en una central.

Hausmann (1990), el mejoramiento de las zonas con presencia de arcilla débil o compresible se hace comúnmente mediante la eliminación de los suelos arcillosos de baja capacidad de soporte y se reemplazan por otros más competentes, tales como grava arenosa compactada, piedra triturada, o agregados livianos para aumentar la capacidad de carga.

Kukko (2000), aunque esto se considera una buena solución, por lo general tiene el inconveniente de alto costo debido al material de reemplazo. El uso de aditivos, derivados de la combustión de carbón, como cenizas volantes se considera una solución más rentable. Resulta con adecuadas propiedades o mejoras de la ingeniería, al tratar los suelos de fundación.

En países como EE.UU., India, Japón, China y de Europa, de la combustión del carbón se obtiene los subproductos de la combustión del carbón que se utilizan en múltiples aplicaciones (IEA, 2005). De acuerdo con el American Coal Ash Association (ACAA), en 2003 se generaron más de 121 millones de toneladas de los productos de Combustión del calor (PCC) se tiene que 70 millones de toneladas fueron cenizas volantes y 18,1 millones de toneladas fueron cenizas de fondo

Pérez (2012), el consumo de carbón en el Perú se inició en junio del año 2000 con la central térmica a vapor ILO21 de Ener Sur, que es la única que utiliza esta fuente de energía. La energía producida en el año 2002 fue de 845,9 GWh (0.363 t/MWh), y representa el 21,5% de generación por centrales térmicas y el 3,8% del total nacional. El consumo de carbón mineral en el 2002 ascendió a 307,660 toneladas en la generación de energía eléctrica.

## **2.2 Aplicación de la Ceniza Volante**

Davidovits J. (1993), desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín<sup>5</sup> y Metacaolín<sup>6</sup>, la mezcla de este aluminio-silicato sólido con una solución cáustica altamente alcalina constituida con hidróxidos y/o silicatos produce un material sintético, identificando que las propiedades ligantes de los geopolímeros son atribuidas a que las especies disueltas tras la activación alcalina son polimerizadas, de manera que se

produce una red tridimensional amorfa de los aluminosilicatos, que endurece rápidamente y presenta buenas propiedades mecánicas.

Sobhan & Mashnad (2003), Menciona que los métodos cementantes fundados en cenizas de carbón activadas son menos idóneos de formar el esparcimiento por la reacción álcali-sílice que el cemento Pórtland.

Según García - Lodeiro, Palomo, & Fernández-Jiménez (2007) Se han logrado resistencias de hasta 7000 kPa ajustando 10% de cemento y 10% de ceniza de carbón y 80% de suelo. Ryu, Lee, Koh, & Chung (2013) expresan que las cenizas de carbón pueden obtener a manipular para sustituir el cemento Pórtland al activarse con una solución alcalina.

Robayo Nuñez (2013) refiere que en este sentido, el beneficio de residuos de como humo de sílice, escorias de alto horno, cenizas de carbón, en la elaboración de materiales electivos de construcción se ha venido contemplando como una de las alternativas de sustitución del cemento convencional, se han usado a cabo estudios e indagaciones para la valoración de las diferentes propiedades de los materiales.

Robayo Nuñez (2013) muestra la manera experimental radicó en la elaboración de doce cementos, mezclando un cemento base con dos muestras de cenizas de carbón, provenientes de industrias ladrilleras, en peso de adición de ceniza de 5, 10, 15, 20, 30 y 40 por ciento, se les realizaron pruebas físicas y químicas para definir y especificar los cementos agregados.

Dicho estudio revelando que la adición de cenizas de carbón mejora la resistencia mecánica del cemento comparado con los requisitos mínimos exigidos para un cemento tipo I, de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana, de igual forma, comprobaron que la adición otorga al cemento una reducción en su calor de hidratación y un aumento en el requerimiento de agua. Obteniendo resistencias para edades de 1, 3, 7 y 28 días, entre 7,8 MPa y 40,0 MPa, como se evidencia en la Figura N° 1 y Figura N° 2, mostradas a continuación.

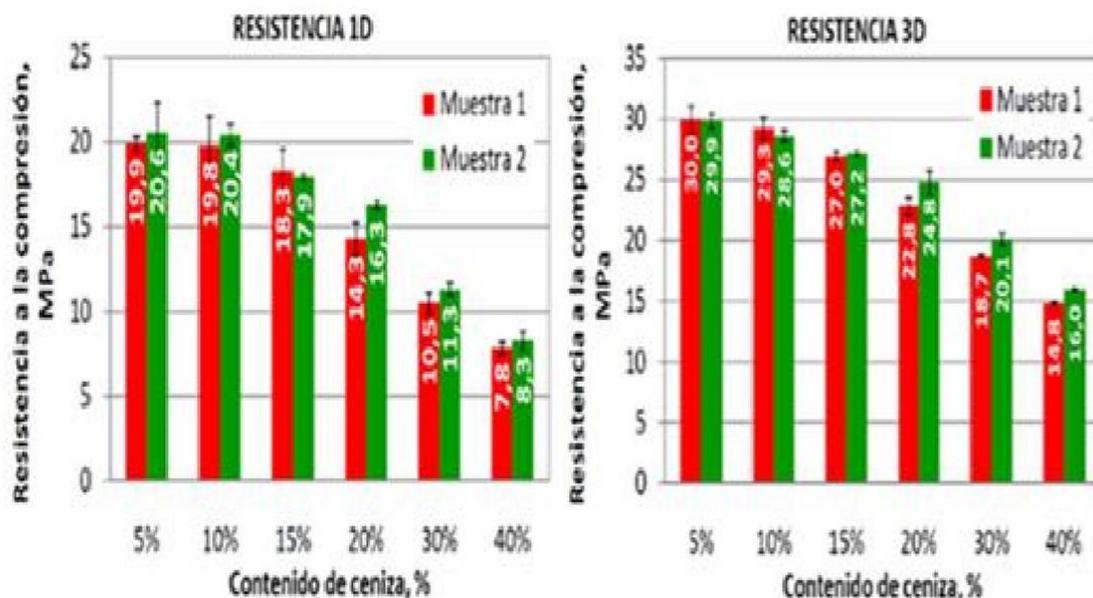


Figura 1: Resistencia a compresión a edades de 1 día y 3 días

Fuente: Quijano (2010)

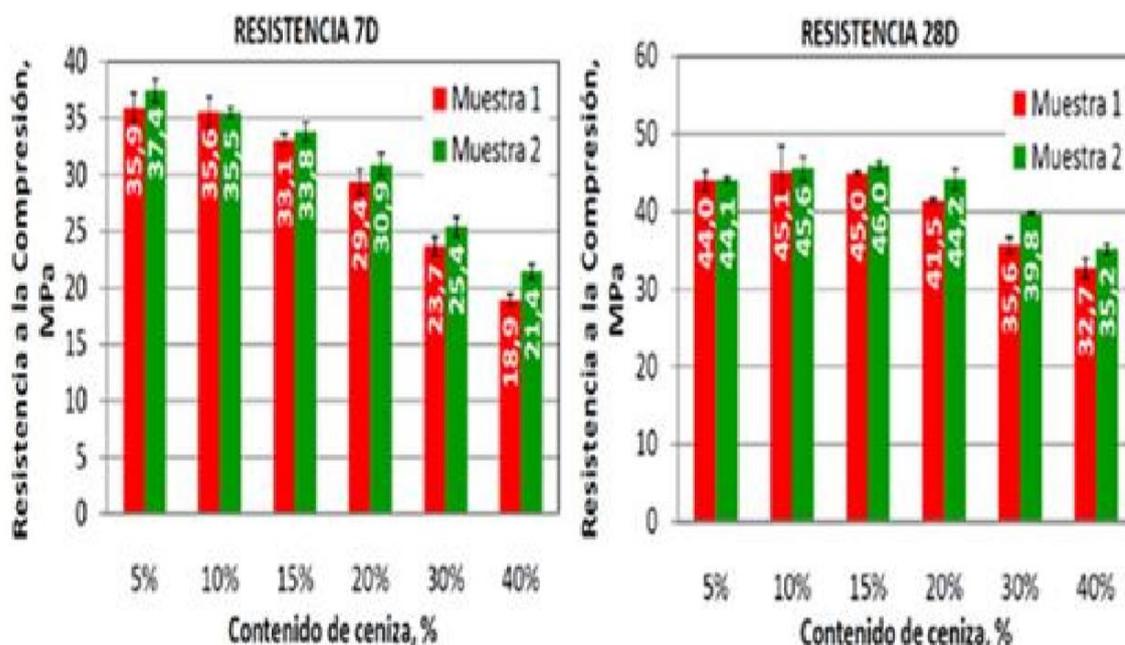


Figura 2: Resistencia a compresión a edades de 7 día y 28 días

Fuente: Quijano (2010)

García - Lodeiro, Palomo, & Fernández-Jiménez (2007) en su estudio de las propiedades los Hormigones de Ceniza de carbón, la durabilidad de los materiales está relacionada con la composición mineralógica y microestructura de los mismos. En los Concretos, morteros a base de cemento portland el principal problema durabilidad se encuentra

relacionado en la mayoría de los casos, con la presencia de calcio. Sin embargo en los cementos basados en la activación alcalina de ceniza de carbón el principal producto de reacción que se forma es un gel de aluminosilicatos hidratado, sin calcio, por lo que el comportamiento durable de los cementos alcalinos ha de ser por fuerza diferente.

Rodríguez E. (2009), en la Universidad Politécnica de Valencia, España, valoró el modo ordinario el procedimiento mecánico y algunas peculiaridades micro-estructurales de morteros geopoliméricos, derivados a partir de una ceniza baja en calcio, con el propósito de establecer las situaciones inmejorables de diseño y producción, donde se estudió la eficiencia de diferentes activadores alcalinos alternos y la reforma de algunos parámetros de dosificación, como el secuela de la naturaleza del ion alcalino, la afiliación de una fuente extra de calcio y el comprendido de agua de amasado. Observando por medio de la microscopia, que las propiedades físicas de geopolímeros asentados en cenizas dependen directamente de la cantidad de sílice presente, el cual se le viene incorporando a través de la solución activante, por lo se esperaría que la resistencia mecánica de la estructura aumente con el incremento de sílice, evaluando la incidencia de trabajar con ceniza molida y la original, teniendo como activadores alcalinos Oxido de Sodio  $\text{Na}_2\text{O}$  Y Oxido de Silicio  $\text{SiO}_2$ .

### **Observando por microscopio las propiedades de Geopolímeros basados en Cenizas**

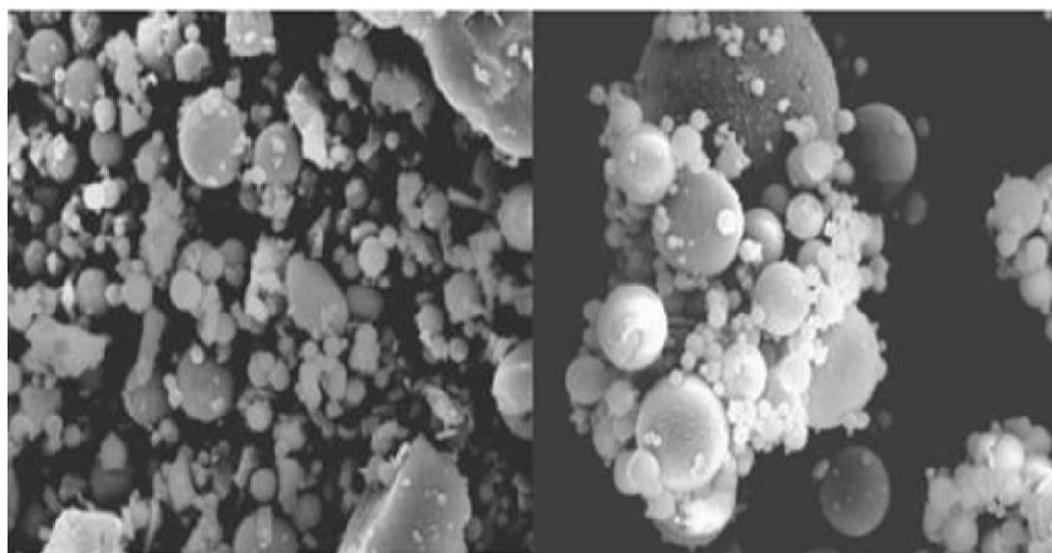


Figura 3: Cenizas de Carbón y molida

Fuente: Erich Rodríguez (2009)

Nardi (1975), el primer registro de uso de la ceniza volante en pavimentación se produjo en 1938, en los Estados Unidos, cuando el Distrito Sanitario de Chicago utilizó de 20 a 50% de cenizas volantes como un sustituto del cemento en pavimento en un tramo de media milla de una carretera local. El autor describe una construcción de pistas de aterrizaje en el aeropuerto de Newark, también en los Estados Unidos, donde se utilizó aproximadamente 730,000 toneladas de cenizas, juntamente con el uso de arena de mar dragada que se utiliza en terraplén. Y con la instrumentación instalada pudo ser verificado, después de 5 años de operación, que los costos de mantenimiento fueron mucho más bajos que los de pavimentos comunes.

Rohde (2006), En Europa, el uso de cenizas de carbón como aglutinantes estabilizado en bases, sub-bases y refuerzos de sub-base de pavimentos se difundió mucho, desde 1960. Y en países como Inglaterra, Francia, Suecia, Rusia, entre otros, el uso de las cenizas en la pavimentación es parte de las alternativas convencionales.

Marcon (1977), la estabilización de arena con ceniza volante y cal. Este trabajo dio lugar a la implantación de un tramo experimental de prueba que se encuentra en las orillas de la BR-101 en ciudad de Imbituba, en donde fue construido una sub-base de arena estabilizada con cenizas y cal, sobre arena de la subrasante con éxito.

Umaña (2002), Estos residuos de las centrales térmicas son utilizados tradicionalmente en materiales de construcción de la ingeniería civil. Normalmente se usan en bruto o en forma aglomerada. En forma aglomerada para la elaboración de diferentes tipos de cemento y hormigón, en la fabricación de ladrillos, áridos artificiales, materiales refractarios y como aditivo sustitutivo en la industria cerámica y en bruto para la construcción de caminos y ferrovías, como material para pavimento y material de relleno en minería.

Pérez R. (2012) desarrollado en la ciudad de Lima llevando por título “estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos”, siguiendo la siguiente metodología:

El programa experimental considera primero hacer ensayos a la muestra en estado natural que tiene como clasificación SUCS (CH) “arcilla inorgánica de alta plasticidad” (arcilla al 100% denominada subrasante) y luego con la adición de las cenizas. Se ha considerado

adicionar cemento al suelo natural además de la ceniza volante a fin de obtener mejores resultados.

Los ensayos de laboratorio de evaluación de la mezcla han permitido caracterizar mecánicamente a los materiales. Se ha considerado ensayos de CBR del material natural y de la mezcla de materiales de arcilla con ceniza volante y cemento. Los resultados de la evaluación técnica que arrojó esta tesis fue de:

Tabla 1: Resultado del CBR al 100 % con Ceniza Volante Y Cemento 3%.

<b>Ceniza Volante y Cemento</b>	<b>Sin Aditivo</b>	<b>S90/CV7/3</b>	<b>S90/CV17/3</b>	<b>S90/CV27/3</b>
<b>Expansión</b>	5.7%	3.9%	3.6%	2.5%
<b>CBR al 100%</b>	7.7 %	21.9%	39.3%	51%

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

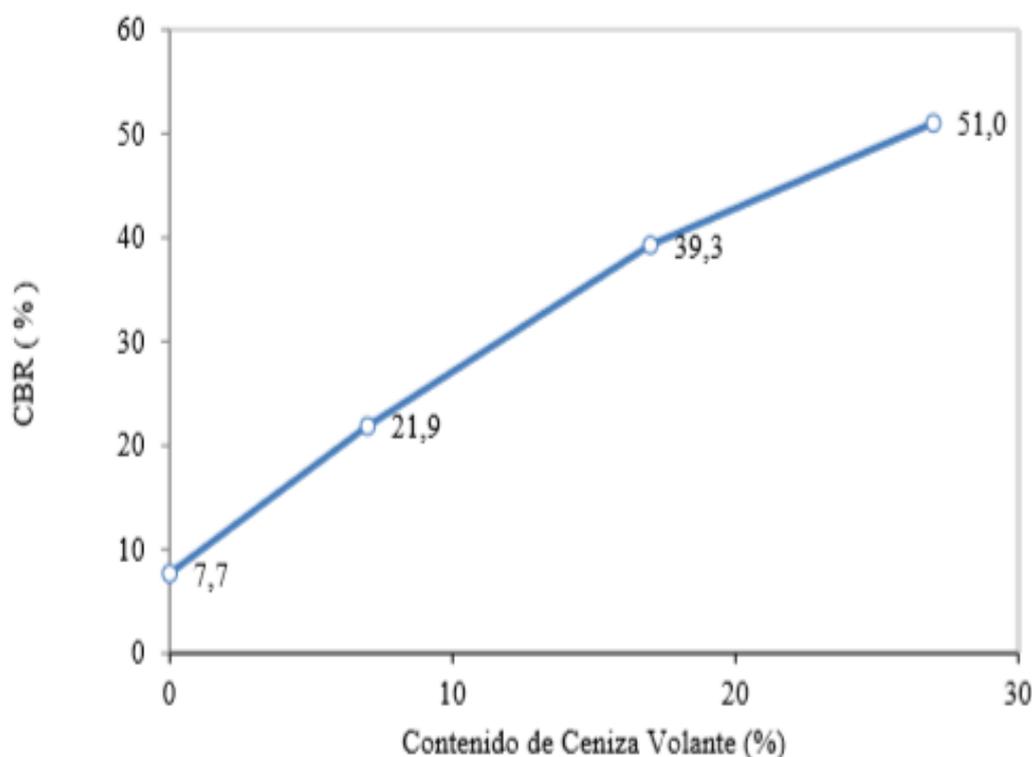


Figura 4: Curva de CBR de Mezcla con Cemento 3% vs. Contenido de Ceniza Volante.

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

En Brasil se han realizado investigaciones sobre el tema, siendo la más reciente de Louise dos Santos Erasmi Lopes, sobre el Tema “Análise do Comportamento Mecánico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos”, en la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro en el año 2011. La investigación presentó la caracterización de dos tipos de ceniza de fondo y volante obtenidos como residuos del carbón mineral usado en una central termoeléctrica, siendo su objetivo utilizar los materiales en obras de pavimentación, a través de mezclas con cenizas y un suelo arenoso y limoso (clasificación SUCS: SM, clasificación AASHTO: A-2-4) característico del estado de Rio de Janeiro; se realizaron ensayos de caracterización física, química y mecánica, así como definir ensayos ambientales.

Los ensayos fueron realizados en suelo puro y mezclas de suelo ceniza de fondo (30-40% de ceniza de fondo) y suelo ceniza volante (10-20% de ceniza volante), relacionados al peso seco. También fueron ensayados muestras con la adición de 3% de cal. Con los resultados de ensayos mecánicos se procedió a calcular los espesores para una estructura típica del pavimento.

Las mezclas de suelo con ceniza presentan un comportamiento mecánico compatible con los requisitos de un pavimento de bajo volumen de tránsito. Los resultados muestran que el suelo es dependiente de la presión de confinamiento, la adición de cenizas volantes y el curado previo aumentan considerablemente el valor del módulo de resiliencia con la correspondiente disminución de los espesores de capas de base del pavimento en el diseño, en comparación a un suelo puro para un mismo nivel de carga y mismos criterios de diseño.

A continuación, en las Tablas 2 y 3 se presentan algunos resultados obtenidos de sus ensayos:

Tabla 2: Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiado

Material	Cura días	compactación		Módulo de Resiliencia			
		O.C.H. %	M.D.S. g/cm <sup>3</sup>	k1	k2	k3	coef. De correlac. R <sup>2</sup>
S	0	9.72	2.065	251	0.54	-0.3	0.827
				129	0.05	-0.04	0.064
				197	0.46	-0.32	0.718
S90/CV7/C3	0	11.39	1.902	455	0.52	-0.23	0.904
	7			489	0.38	-0.24	0.723
	28			1209	0.43	0.01	0.969
	90			1209	0.33	-0.03	0.812
	0	11.47	1.895	455	0.52	-0.17	0.93
	7			543	0.4	-0.12	0.798
	28			1150	0.48	0.01	0.935
	90			981	0.31	-0.03	0.779
	0	11.25	1.926	479	0.47	-0.11	0.736
	7			317	0.23	-0.24	0.573
	28			1467	0.49	-0.02	0.988
	90			1237	0.32	-0.03	0.821
S80/CV17/C3	0	12.59	1.824	383	0.48	-0.22	0.83
	7			871	0.47	-0.05	0.937
	28			1434	0.45	0.05	0.978
	90			1854	0.53	0.11	0.952
	0	12.79	1.798	382	0.45	-0.21	0.875
	7			771	0.43	-0.05	0.916
	28			1303	0.46	0.05	0.975
	90			1297	0.42	0.09	0.955
	0	12.78	1.803	383	0.46	-0.19	0.824
	7			843	0.47	-0.04	0.906
	28			1267	0.45	0.02	0.951
	90			1355	0.41	0.12	0.974

Nota: S=Suelo, CV=Ceniza Volante; C=Cal

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

Tabla 3: Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiados

Material	Cura días	Compactación		Módulo de Resiliencia			
		O.C.H. %	M.D.S. g/cm <sup>3</sup>	k1	k2	k3	coef. De correlac. R <sup>2</sup>
S90/CV10	0	10.87	1.958	208	0.48	-0.23	0.798
	35			254	0.39	-0.24	0.729
	90			276	0.43	-0.03	0.86
	0	11.58	1.963	180	0.45	-0.17	0.93
	35			230	0.49	0.01	0.935
	90			139	0.42	-0.03	0.779
	0	11.32	1.96	244	0.45	-0.11	0.736
	35			231	0.39	-0.02	0.988
	90			311	0.42	-0.03	0.821
S80/CV20	0	11.27	1.92	242	0.42	-0.22	0.83
	35			185	0.33	0.05	0.978
	90			305	0.39	0.11	0.952
	0	11.32	1.924	114	0.26	-0.21	0.875
	35			169	0.33	0.05	0.975
	90			333	0.4	0.09	0
	0	11.44	1.884	x	x	x	x
	35			241	0.4	-0.2	0.685
	90			277	0.4	-0.1	0.816

Nota: S=Suelo, CV=Ceniza Volante

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

De este modo considerando los coeficientes k2 y k3, presentados en las Tablas 2 y 3, se puede concluir que, tanto en el suelo natural como en todas las mezclas estudiadas, la presión confinante ejerce mayor influencia en el comportamiento resiliente, así como ocurre en la mayoría de los materiales granulares. Se concluye que todas las mezclas analizadas, con la presencia de cal, son adecuadas a la utilización de en la capa de base de pavimentos típico, haciendo que el suelo, antes inadecuado a este proyecto tenga un

comportamiento mecánico necesario para pavimentos de bajo volumen de tránsito. Siendo la mezcla de S90/CV7/C3 la que presentó mejores resultados.

Los resultados con ceniza de fondo también presentaron resultados satisfactorios, con una combinación de mezcla de S70/CV27/C3.

En Brasil también se presentó en la revista de Soils and Rocks de fecha Enero a Abril del presente año 2012, un artículo titulado “Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers”, F.H.M. Portelinha, D.C. Lima, M.P.F. Fontes, C.A.B. Carvalho; donde se explica la investigación realizada sobre suelos lateríticos de Brasil y que están ampliamente extendidos en el territorio nacional y que han sido utilizados como sub-base de capas de pavimentos. Específicamente, los suelos arcillosos de color rojo y amarillo se caracterizan como materiales de baja capacidad de carga para las capas de pavimentos flexibles. Como una solución convencional, se ha utilizado como pavimento de refuerzo de subrasante la estabilización de suelos con cal hidratada o cemento Portland. No obstante, la adición de bajos contenidos de estabilizadores en la modificación del suelo, no se han aplicado de manera regular en los diseños de carreteras. El propósito de este trabajo es evaluar el uso de bajo contenido de cal y cemento en la modificación de las propiedades de los suelos lateríticos y una relación con el comportamiento de las mezclas desde el inicio de la construcción hasta el producto final resultante. En este punto se evaluaron, la manejabilidad, propiedades químicas, comportamiento mecánico y la composición mineralógica. Los análisis mecanicistas se realizaron con el fin de verificar las fallas por fatiga de las capas de pavimento en carreteras. Los resultados experimentales mostraron que la adición de 2% y 3% de cal o cemento fue suficiente para cambiar la trabajabilidad y la resistencia mecánica del suelo. Además, del análisis mecanicista apoyó la técnica de estabilización del suelo como una valiosa práctica con bajas tensiones elásticas en la capa de asfalto cuando se aplican en capas de base de pavimento.

Los resultados respaldan la estabilización de las pruebas de suelo con cal y cemento, lo cual es una técnica eficiente y económica para el diseño de pavimento flexible y su construcción, se presenta las conclusiones del estudio y son las siguientes:

- Bajos contenidos de cal y cemento fueron eficientes en cambios de trabajabilidad de suelos lateríticos de color rojo-amarillo, destacando mejores cambios por adición de 3% de cemento.

Otras adiciones de cal y cemento no cambian el IP del suelo. Ver Figura 5 y 6

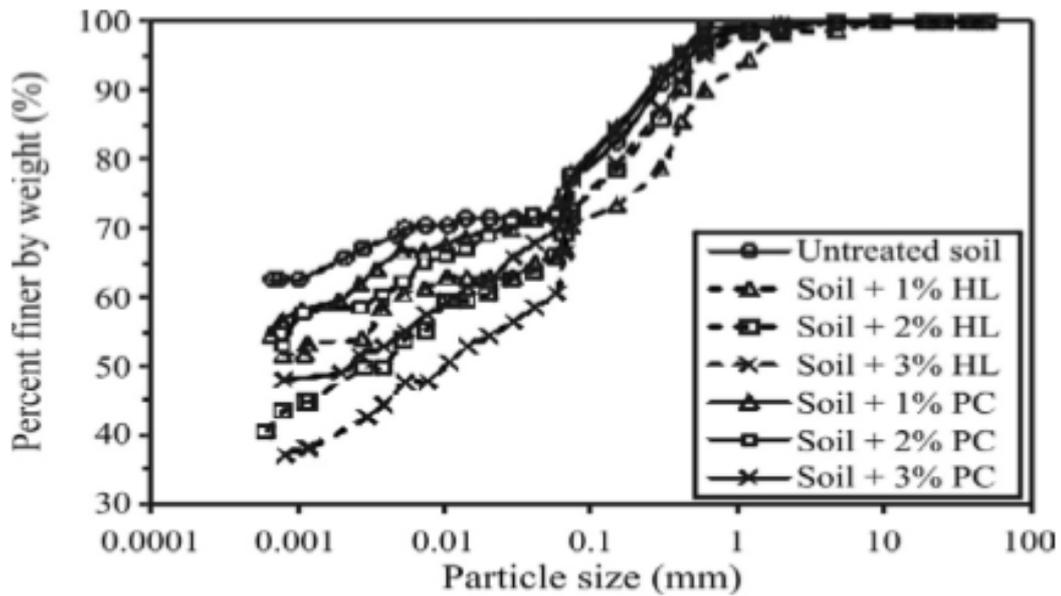


Figura 5: Distribución de Partículas de Mezclas de Suelo Cal y Suelo Cemento

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

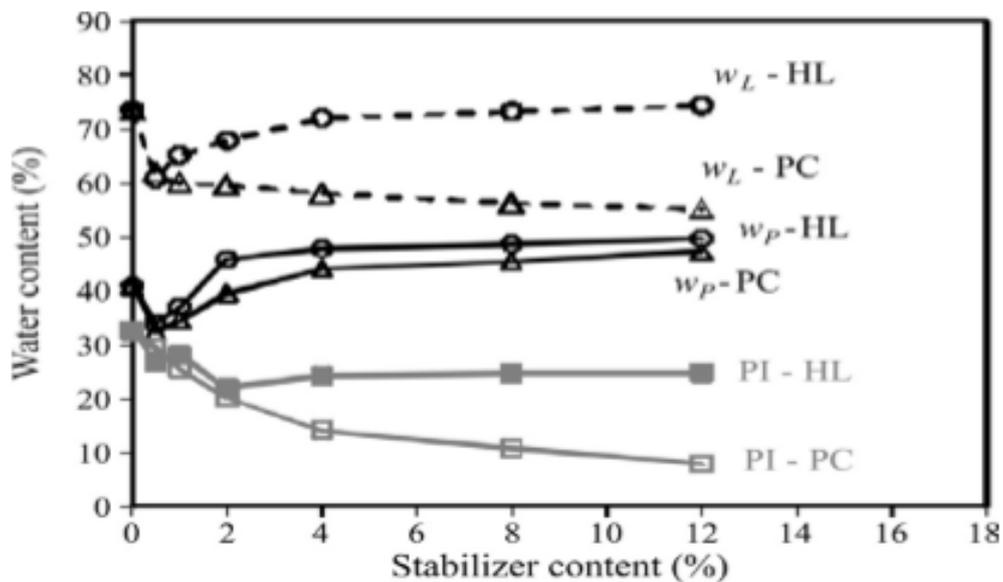


Figura 6: Límites de Atterberg vs Contenidos de Estabilizadores

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

- Las propiedades químicas de las mezclas son compatibles con el comportamiento de plasticidad, mostrando que la cantidad de cal es de alrededor de 3% en este suelo. Por lo tanto, puede soportar las alteraciones mineralógicas. Hidratación y reacción del cemento favorece la disminución del IP.
- La cal estabiliza y elimina la hinchazón del suelo, mientras que la adición del 2% de cemento la incrementa; ver Figura 7

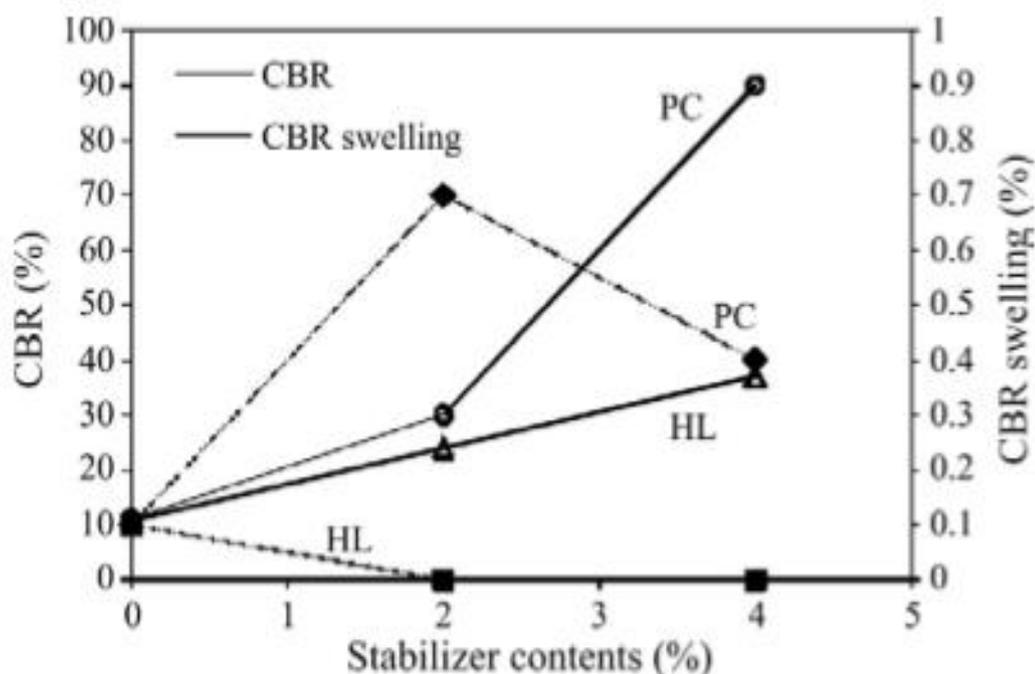


Figura 7: %CBR y % Expansión del CBR vs. Contenido de Estabilizadores

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

- El suelo estabilizado promueve el incremento de esfuerzos y el módulo inicial tangente, principalmente después de 28 días de curado, donde el cemento es el material más eficiente. Las alteraciones mayores de esfuerzos ocurrieron con 2% y 3% de cal y cemento, aunque la adición de 1% era suficiente para proporcionar 50% del aumento de resistencia a la compresión no confinada en comparación con el suelo sin tratar. Aumentó el modulo tangente inicial y fueron significativamente mayores que la compresión no confinada de esfuerzos (UCS) y generadas por adición de bajos contenidos de estabilizadores. Ver Figura 8.

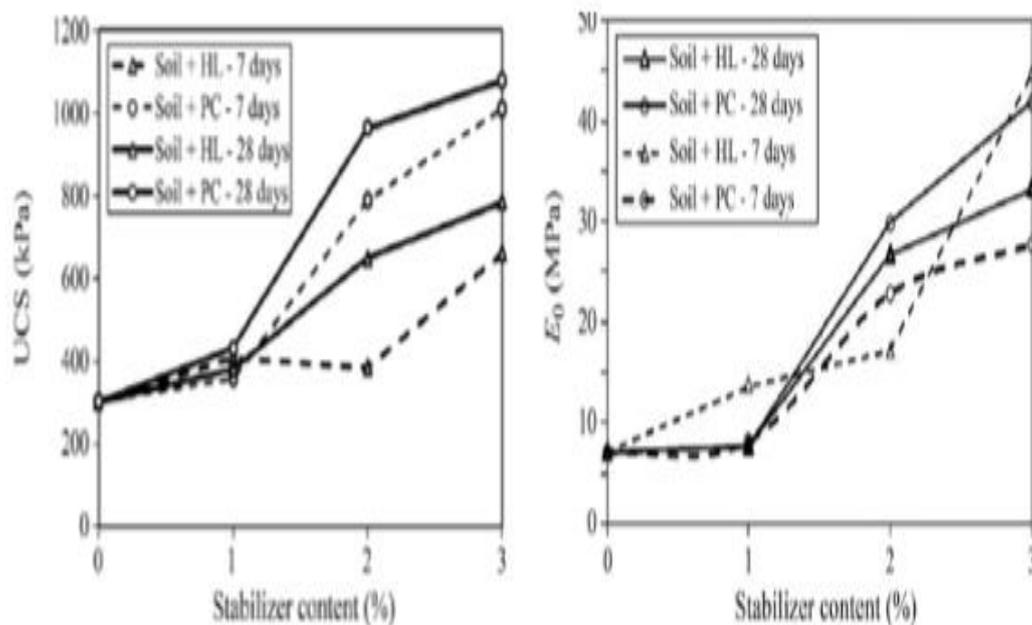


Figura 8: UCS a) Modulo Tangente Inicial b) Mezclas de Limo, Cemento, después de 7 y 28 Días de Curado

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

- Se observó que las alteraciones mineralógicas han ocurrido en muestras que presentan aumentos significativos de esfuerzos.
- Los análisis mecanicistas mostraron que la estabilización del suelo se puede aplicar a la base de diseño de pavimentos flexibles produciendo bajas tensiones elásticas y niveles de esfuerzo. Adicionalmente, la más eficiente (económica y mecánicamente) configuración de pavimentos se sugiere en este estudio fue la mejora de la sub rasante de suelo o estabilización de la base.

## 2.3. Suelo

### 2.3.1 El suelo y su origen

A través de un proceso de desintegración mecánica y descomposición química, las rocas de la corteza terrestre forman los materiales sueltos que se encuentran en ella.

El término “suelo” ha sido definido de diferentes maneras, algunos ingenieros civiles lo definen:

Rico y H. del Castillo (1998) definen al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes.

Otro autor, Alfred R. Jumikis, doctor en ingeniería, lo define como sedimentos no consolidados y depósitos de partículas sólidas derivadas de la desintegración de las rocas. Se define como una capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan. (Crespo Villalaz, 2004).

### 2.3.2. Principales tipos de suelos

A continuación, se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados por el ingeniero civil para su identificación.

- **GRAVAS:** Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en los márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido retransportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7.62cm (3") hasta 2.0 mm.

La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica dependen de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

- **ARENAS:** La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas estando limpias no

se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea. (Crespo Villalaz, 2004).

- **LIMOS:** Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar. (Crespo Villalaz, 2004).
- **ARCILLAS:** Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar.  
De hecho, se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico. (Crespo Villalaz, 2004).

### 2.3.3. Plasticidad de los suelos

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin

romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico.

Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

- **LÍMITE LÍQUIDO:** El límite líquido se define como el contenido de humedad expresada en por ciento con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida, y según Atterberg es de 25g/cm<sup>2</sup>. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 2004).
- **LÍMITE PLÁSTICO:** El Límite Plástico (L.P) se define como el contenido de humedad, expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. (Crespo Villalaz, 2004).
- **ÍNDICE DE PLASTICIDAD:** Se denomina Índice de Plasticidad o Índice plástico (I.P) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico tal como lo definen los ensayos. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Comparando el índice de Plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso. (Crespo Villalaz, 2004).

#### **2.3.4. Clasificación de los suelos**

Un Sistema de Clasificación de los Suelos es una agrupación de éstos con características semejantes. El propósito es estimar en forma fácil las propiedades de un suelo por comparación con otros del mismo tipo, cuyas características se conocen. Son tantas las

propiedades y combinaciones en los suelos y múltiples los intereses ingenieriles, que las clasificaciones están orientadas al campo de ingeniería para el cual se desarrollaron, por consiguiente, sólo se explicarán las clasificaciones empleadas en obras viales.

#### 2.3.4.1. Sistema AASHTO M-145

El Departamento de Caminos Públicos de USA (Bureau of Public Roads) introdujo en 1929 uno de los primeros sistemas de clasificación, para evaluar los suelos sobre los cuales se construían las carreteras. En 1945 fue modificado y a partir de entonces se le conoce como Sistema AASHO y recientemente AASHTO.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en siete grupos, basado en las determinaciones de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. La evaluación en cada grupo se hace mediante un "índice de grupo", el cual se calcula por la fórmula empírica:

$$IG = (F-35) \cdot (0.2 + 0.005(L.L-40)) + 0.01(F-15) (I.P-10)$$

Dónde:

F = Porcentaje que pasa por el tamiz ASTM N°200 (0.08 mm),  
expresado en números enteros.

L.L = Límite Líquido.

IP = Índice de Plasticidad.

Se informa en números enteros y si es negativo se informa igual a 0. El grupo de clasificación, incluyendo el índice de grupo, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de subrasante, subbases y bases. Disponiendo de los resultados de los ensayos requeridos, proceda en la Tabla 2 de izquierda a derecha y el grupo correcto se encontrará por eliminación. El primer grupo desde la izquierda que satisface los datos de ensayo es la clasificación correcta. Todos los valores límites son enteros, si alguno de los datos es decimal, se debe aproximar al entero más cercano.

El valor del índice de grupo debe ir siempre en paréntesis después del símbolo del grupo, como: A-2-6 (3); A-7-5 (17), etc.

Este método define:

- **Grava:** Material que pasa por la malla de 75 mm (3") y es retenido en la malla de 2mm (N°10).
- **Arena Gruesa:** Material comprendido entre la malla de 2 mm (N°10) y la malla de 0.50 mm (N°40).
- **Arena Fina:** Material comprendido entre la malla de 0,50mm (N°40) y la malla de 0,08 mm (N°200).
- **Limo Arcilla:** Material que pasa por la malla de 0,08 mm (N°200).

El término material granular se aplica a aquellos con 35% o menos que pasa la malla de 0,08 mm (N°200); limoso a los materiales finos que tienen un índice de plasticidad de 10 o menor; y arcilloso se aplica a los materiales finos que tienen índice de plasticidad 11 o mayor. Materiales limo arcilla contienen más del 35% pasante la malla de 0,08 mm (N°200).

- Cuando se calcula índices de grupo de los subgrupos A-2-6 y A-2-7, use solamente el término del índice de plasticidad de la fórmula.
- Cuando el suelo es NP o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar (0).
- Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificado como A-8 sólo con una inspección visual, sin considerar el porcentaje pasante la malla de 0,08 mm (N°200), límite líquido e índice de plasticidad. Generalmente es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto. (Universidad Católica del Norte, 2013)

Tabla 4: Sistema de Clasificación AASHTO

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO**

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx	-	-	-				-	-		
	30 máx	50 máx	51 mín	-				-	-		
	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx				36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Límite líquido Índice de plasticidad	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Fuente: (Gonzales Boada, 2005)

**2.3.4.2. Sistema unificado de clasificación de suelos USCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) deriva de un sistema desarrollado por A. Casagrande para identificar y agrupar suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra. Este sistema divide los suelos primero en dos grandes grupos, de granos gruesos y de granos finos. Los primeros tienen más del 50 por ciento en peso de granos mayores que 0,08 mm (N°200); se representan por el símbolo G si más de la mitad, en peso, de las partículas gruesas son retenidas en tamiz de 5 mm (N°4), y por el símbolo S si más de la mitad pasa por tamiz de 5 mm (N°4).

A la G o a la S se les agrega una segunda letra que describe la graduación:

W, buena graduación con poco o ningún fino; P, graduación pobre, uniforme o discontinua con poco o ningún fino; M, que contiene limo o limo y arena; C, que contiene arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos, con más del 50 por ciento bajo tamiz de 0,08 mm (N°200), se dividen en tres grupos, las arcillas (C), los limos (M) y limos o arcillas orgánicos (O).

Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que depende de la magnitud del límite líquido e indica la compresibilidad relativa: L, si el límite líquido es menor a 50 y H, si es mayor. Para mayor comprensión describiremos el procedimiento de clasificación:

**Procedimiento de Clasificación de Suelos de granos gruesos (más de 50% retenido en 0,08 mm (N°200)).**

- Una vez efectuados los ensayos de clasificación, determine la distribución acumulativa de los tamaños de las partículas y clasifique la muestra como grava (G), si el 50%, o más de la fracción gruesa ( $> 0,08\text{mm}$ ) es retenida en tamiz 5 mm (N°4), y clasifíquela como arena (S), si más del 50% de la fracción gruesa ( $> 0,08\text{ mm}$ ) pasa por tamiz 5 mm (N°4).
- Si menos d
- el 5% en peso de la muestra pasa por tamiz 0,08 mm (N°200), calcule:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Y} \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} + D_{60}}$$

- Clasifique la muestra como grava bien graduada (GW), o arena bien graduada (SW), si  $C_c$  es mayor que 4 para las gravas y mayor que 6 para las arenas, y  $CL$  está comprendido entre 1 y 3.
- Clasifique la muestra como grava pobremente graduada (GP), o arena pobremente graduada (SP), si no se satisfacen simultáneamente los criterios de  $C_c$  y  $CL$  para bien graduada.
- Si más que el 12%, en peso, de la muestra de ensaye pasa por 0,08 mm (N°200), analice los valores del límite líquido (L.L) e índice de plasticidad (IP) mediante la línea "A" de la carta de plasticidad). Clasifique la muestra como grava limosa (GM), o arena limosa (SM), si los resultados de los límites de consistencia muestran que los finos son limosos, es decir, si al dibujar L.L versus IP, este punto cae bajo la línea "A" o el IP es menor que 4.

- Clasifique la muestra como grava arcillosa (GC), o arena arcillosa (SC), si los finos son arcillosos, es decir, si al dibujar el w, versus IP, cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7.
- Si el punto del límite líquido versus índice de plasticidad cae prácticamente en la línea "A" o está sobre esta línea, pero el índice de plasticidad está comprendido entre 4 y 7, dé clasificación doble tal como GM-GC o SM-SC.
- Si pasa por tamiz 0,08 mm (N°200) del 5 al 12% de la muestra, el suelo llevará clasificación doble, basada en los criterios de graduación y límites de consistencia, tales como GW-GC o SP-SM. En casos dudosos, la regla es favorecer a la clasificación de menos plasticidad. Por ejemplo una grava con 10% de finos, un C" de 20, C~ de 2,0 y un índice de plasticidad de 6, será clasificado como GW-GM en vez de GW-CG.

**Procedimiento de clasificación de suelos de granos finos (50% o más pasa por 0,08 mm (N°200)).**

- Clasifique el suelo como una arcilla inorgánica (C), si al dibujar el punto del límite líquido versus índice de plasticidad, éste cae sobre la línea "A" y el índice de plasticidad es mayor que 7.

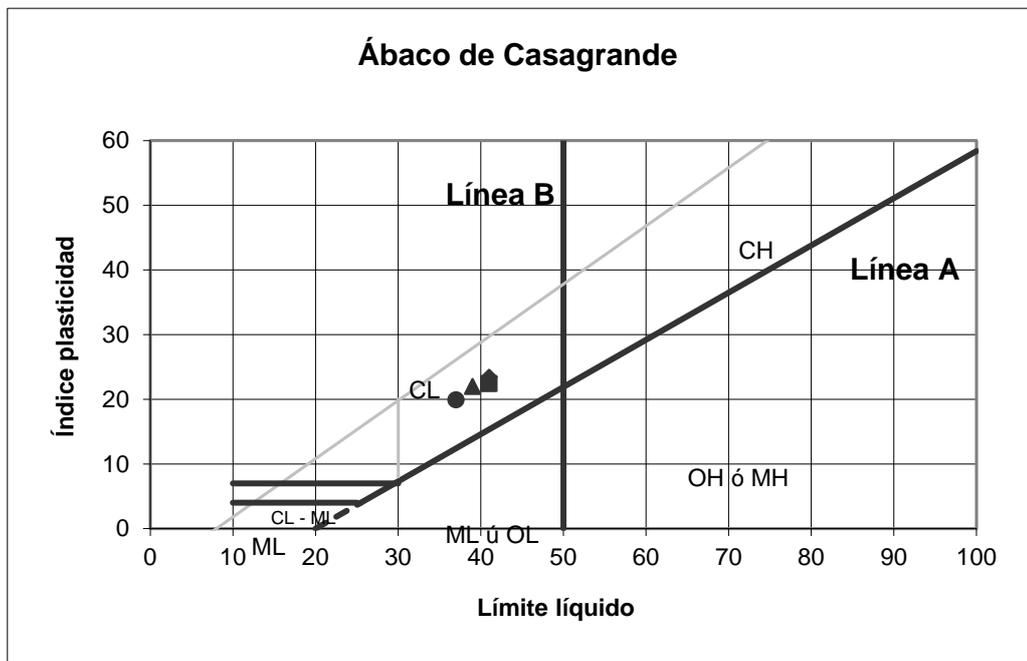


Figura 9: Carta de Plasticidad

Fuente: (Gonzales Boada, 2005)

- Si el límite líquido es menor que 50 y el punto L.L versus IP cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7, clasifíquela como arcilla inorgánica de baja a media plasticidad (CL), y como arcilla de alta plasticidad (CH) si el Límite Líquido es mayor que 50 y el punto L.L versus IP cae sobre la línea A (Carta de plasticidad figura 10). En caso que el límite líquido exceda a 100 o el IP exceda a 60, expanda la carta de plasticidad manteniendo las mismas escalas y pendiente de la línea "A".
- Clasifique el suelo como limo inorgánico (M), si al dibujar el punto L.L versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor que 4, a menos que se sospeche que hay materia orgánica presente en cantidades suficientes como para influir en las propiedades del suelo (suelo de color oscuro y olor orgánico cuando está húmedo y tibio), en cuyo caso se debe efectuar un segundo límite líquido con la muestra de ensaye secada al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Se clasifica como limo o arcilla orgánicos (O), si el límite líquido después del secado al horno, es menor que 75% del límite líquido de la muestra original determinado antes del secado.
- Clasifique el suelo como limo inorgánico de baja plasticidad (ML), o como limo o limo arcilla orgánicos de baja plasticidad (OL), si el límite líquido es menor que 50 y al dibujar L.L versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4.
- Clasifique el suelo como limo inorgánico de media a alta plasticidad (MH), o como una arcilla u limo arcilla orgánico de media a alta plasticidad (OH), sí el L.L. Es mayor que 50 y el punto dibujado de wL versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4.
- Con el fin de indicar sus características de borde, algunos suelos de grano fino deben clasificarse mediante simbología doble. Si el punto dibujado del L.L versus IP cae prácticamente en la línea "A" o sobre la línea "A" donde el Índice de Plasticidad tiene un rango de 4 a 7, el suelo debe tener clasificación doble tales como CL-ML o CH-OH. Si el punto dibujado de L.L versus IP cae prácticamente en la línea del límite líquido igual a 50, el suelo deberá tener clasificación doble tales como CL-CH o ML-MH.

- En casos dudosos la regla de clasificación favorece al más plástico. Por ejemplo, un suelo fino con un  $w_L = 50$  y un índice de plasticidad de 22 se deberá clasificar como CH-MH en lugar de CL-ML.

Este sistema fue adoptado por el U.S. Army Corps of Engineers en 1942 y en 1947 le introdujo algunos límites para evitar doble clasificación. En 1952, el Cuerpo de Ingenieros en conjunto con el Bureau of Reclamation y asesorados por el Dr. Casagrande efectuaron las últimas modificaciones.

Basados en observaciones de terreno y ensayos de Laboratorio de materiales de base para caminos y aeropuertos, el Cuerpo de Ingenieros subdividió los grupos GM y SM en dos grupos, designados por los sufijos "d" y "u", que han sido escogidos para representar a materiales que son convenientes o no, respectivamente, para ser empleados en bases de caminos y aeropuertos. Símbolos típicos son GM, y SM.

Se emplea el sufijo "d" cuando el límite líquido es menor o igual a 25 y el índice de plasticidad menor o igual a 5. (Universidad Católica del Norte, 2013)

Tabla 5: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "U.S.C.S."**

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Gravas limpias</b> (sin o con pocos finos)	<b>GW</b> Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW,GP,SW,SP. >12%->GM,GC,SM,SC. 5 al 12%->casos limite que requieren usar doble símbolo.		
		<b>Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.</b>	<b>GP</b>			
		<b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>GM</b> Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.			
			<b>GC</b> Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.			
	<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Arenas limpias</b> (pocos o sin finos)	<b>SW</b> Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
			<b>SP</b> Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		<b>Arenas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>SM</b> Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		<b>SC</b> Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$ . Encima de línea A con $IP$ entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
						$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
			<b>LOS límites situados en la zona rayada con <math>IP</math> entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble</b>		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$ .	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$ .
					Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$ .	
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b> Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	<b>Limos y arcillas:</b> Límite líquido menor de 50	<b>ML</b> Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plásticidad.				
		<b>CL</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.				
		<b>OL</b> Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.				
	<b>Limos y arcillas:</b> Límite líquido mayor de 50	<b>MH</b> Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.				
		<b>CH</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.				
		<b>OH</b> Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.				
		<b>PT</b> Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.				
<b>Suelos muy orgánicos</b>		<b>PT</b>				

Fuente: (Gonzales Boda, 2005)

### 2.3.5. Compactación de los suelos

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco.

Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua (Braja M., 2001)

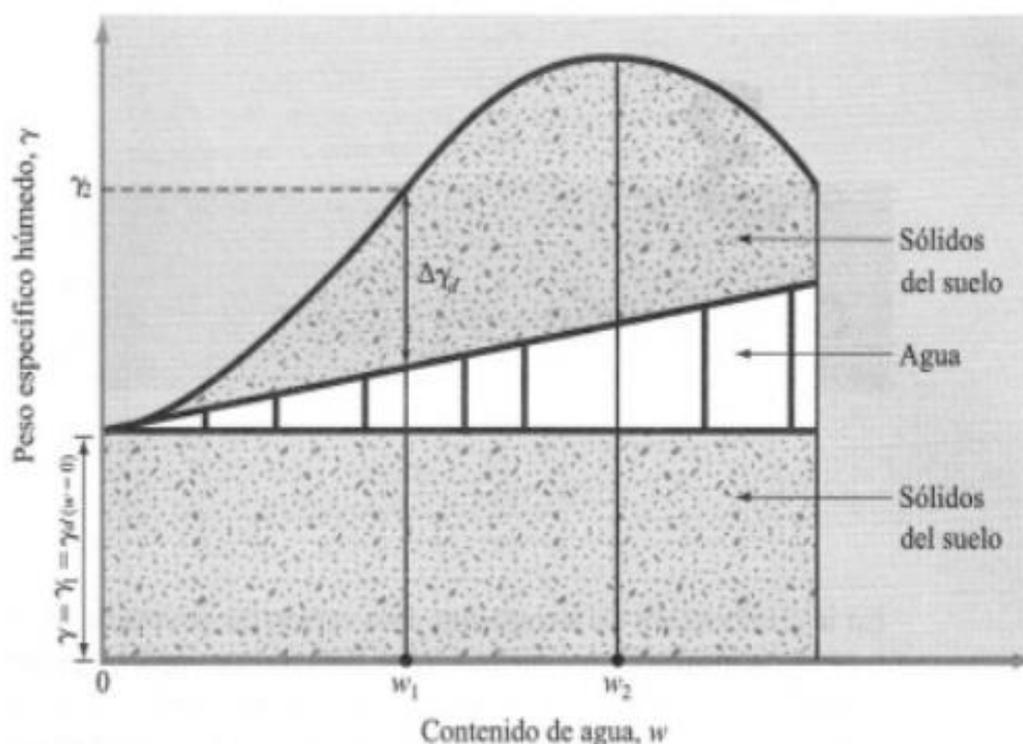


Figura 10: Principios de Compactación

Fuente: (Braja M., 2001)

#### 2.3.5.1. Prueba de Proctor

La prueba de Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Esta prueba tiene por objeto (Crespo Villalaz, 2004).

- Determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material así como la humedad óptima  $W_o$  a que deberá hacerse la compactación.
- Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, aeropuertos y calles, relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo proctor.

### 2.3.5.2. Valor relativo de soporte-ensayo de C.B.R.

El ensayo de C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y esta normado con el número ASTM D 1883-73.

Se aplica para evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de sub – bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%. Este ensayo puede realizarse tanto en laboratorio como en terreno, aunque este último no es muy practicado.

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en Kilos/cm<sup>2</sup> (libras por pulgadas cuadrada, (psi)) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 centímetros cuadrados) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada, en ecuación, esto se expresa:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patron}} * 100$$

Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación son:

Tabla 6: Valores de Carga Unitaria

PENETRACIÓN		CARGA UNITARIA PATRÓN		
mm	pulgada	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	psi
2.54	0.1	6.9	70	1000
5.08	0.2	10.3	105	1500
7.62	0.3	13.1	133	1900
10.16	0.4	15.8	162	2300
12.7	0.5	17.9	183	2600

Fuente: (Universidad Católica del Norte, 2013)

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0,1”), sin embargo, si el valor del CBR para una penetración de 5.08 mm (0,2”) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de CBR. (Universidad Católica del Norte, 2013)

### 2.3.2 Estabilización de Suelos

Como su nombre lo indica, con este proceso se pretende hacer más estable a un suelo. La razón primordial que acompaña a todas las estabilizaciones, es el de mejorar y cambiar las propiedades de un suelo. Existen muchas formas de estabilizar un material, un método muy usado de estabilización es la de mezclar a un material de granulometría gruesa, otro que carece de esa característica. Finalmente, está el recurso de estabilizar un suelo mezclándole cemento, cal, asfalto entre otros.

Los siguientes casos pueden justificar una estabilización:

- a) Un suelo de sub rasante desfavorable, o muy arenoso, o muy arcilloso.
- b) Materiales para base o sub base en el límite de especificaciones.
- c) Condiciones de humedad.
- d) Cuando se necesite una base de calidad superior, como en una autopista.
- e) Para el aprovechamiento de los materiales existentes del lugar de construcción de la obra.

Los agentes estabilizadores más usados para mezclarlos con suelo y formar capas de pavimento son: el cemento, la cal y el asfalto.

Pérez (2012), la técnica de estabilización de suelos con cenizas de carbón se basa en la interacción de los elementos presentes en el suelo, de los componentes del medio ambiente y de la ceniza adicionada. El suelo influye de acuerdo con su mineralogía, o sea, presencia de cuarzo y minerales de arcillas; el medio ambiente influencia por medio de factores como temperatura, agua y aire: y las cenizas interactúan con el sistema debido a la presencia de óxido de calcio o magnesio. Esta interdependencia se manifiesta en función de las reacciones físicas, químicas y físico-químicas, predominantemente de las que ocurren entre las cenizas y el suelo. Así, el proceso de estabilización envuelve cuatro reacciones distintas que son: intercambio iónico, la floculación y aglomeración, reacciones puzolánicas y carbonatación

El MTC manual de Carreteras la estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos

Núñez (2011), nos dice llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose firme y estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad.

Rico y del Castillo (1998), son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades del suelo, con vistas a hacerlo apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización. La siguiente lista de tipos de procedimientos no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes.

- Estabilización por medios por medios mecánicos, la compactación es el más conocido, pero la mezcla de suelos se utiliza también frecuentemente.
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrólisis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejor conocidos.
- Estabilización por empleo de calor y calcinación.

- Estabilización por medios químicos generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros

### **2.3.7.1 Propiedades geotécnicas que se mejoran.**

#### A. Estabilidad volumétrica.

El suelo también puede expandir su volumen dependiendo del grado de humedad y del tipo de suelo, es importante que su volumen sea estable y no varía significativamente bajo condiciones naturales.

#### B. Resistencia mecánica.

Es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión, esta fuerza de cohesión depende directamente del contenido de humedad y del tipo de suelo en estudio ya sea arcilla, arena o limo.

#### C. Permeabilidad.

Es la participación que tiene el suelo para transferir el agua y el aire a través de sus partículas. Mientras más permeable sea el suelo pues mayor filtración originara.

#### D. Comprensibilidad.

Es la capacidad del suelo para reducir el espacio entre sus partículas y disminuir su volumen y como consecuencia de esto tener mayor consistencia y también resistencia mecánica.

### **2.3.3 Estabilización Química**

Es de vital importancia para el ingeniero conocer las variadas opciones de estabilización de suelos por este método ya que cada una de ellas es esencial y eficaz para cada tipo de suelo. Hasta el momento se conocen las siguientes alternativas:

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y puede ser económica.
- Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Emulsiones Asfálticas: es muy usada para material triturado sin cohesión.

- Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen la producción de los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen la producción de los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Magnesio: impermeabilizan y disminuyen la producción de los polvos en el suelo.
- Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Caucho de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Ravines (2010), se usa por la adición de agentes estabilizantes químicos específicos; comúnmente se usa cemento, cal, asfalto, cemento portland, entre otros. Con esta tecnología de estabilización se busca generar una reacción química del suelo con el estabilizante para lograr la modificación de las características y propiedades del suelo; y así darle mayor capacidad de respuesta a los requerimientos de carga dinámica a los que estará sometido (p.15). Los estabilizadores químicos pueden tener tres categorías:

- Para cubrir e impermeabilizar los granos del suelo o proveer de fuerza cohesiva.
- Para formar una adhesión cementante entre las partículas del suelo; proporcionándoles fuerza y durabilidad.
- Para suelos finos tipo arcillas; generarán una alteración en la naturaleza del sistema agua-arcilla, con la cual se tendrá como resultado una baja en la plasticidad; posibles cambios de volumen; hará que se formen uniones cementantes y por último se mejorará la resistencia aumentándola.

RNE C.E.020 La dosificación depende del tipo de arcilla. Se agregará de 2% a 8% de cal por peso seco de suelo. Este porcentaje debe determinarse en el laboratorio, siguiendo los pasos siguientes:

- Estimar el porcentaje de cal en función del pH.
- Elaborar especímenes para el ensayo de compresión no confinada a la humedad óptima y máxima densidad seca.

- Determinar el incremento de la resistencia del suelo estabilizado con cal.
- Si el incremento de resistencia, con el porcentaje de cal elegido, es mayor a 3.5 kg/cm<sup>2</sup>, determinar la variación en la resistencia para especímenes elaborados con + 2% de cal.
- Determinar el contenido de cal para el cual la resistencia no aumenta en forma importante.
- Elaborar una gráfica de resistencia y % de cal.

En todo documento técnico o análisis técnico, deberá adjuntarse los gráficos y sustento técnico que ilustren objetivamente las mejoras obtenidas con cal hidratada, indicando claramente los porcentajes de participación y valores alcanzados con ello. Además se debe reportar resultados de la capacidad de soporte según la

La efectividad de los agentes estabilizadores debe cumplir con lo indicado en la siguiente tabla 7:

Tabla 7: Efectividad de los agentes estabilizadores

TIPO DE SUELO	Arcillas Finas	Arcillas Gruesas	Limos finos	Limos Gruesos	Arenas Finas	Arenas Gruesas
Tamaño de partícula (mm)	< 0,0006	0,0006 - 0,002	0,002 - 0,01	0,01 - 0,06	0,06 - 0,4	0,4 - 2,0
Estabilidad volumétrica	Muy pobre	Regular	Regular	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
CAL	SI	SI	SI			
CEMENTO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
ASFALTO					SI	SI

Fuente: RNE C.E.020

### 2.3.4 Estabilización con Cal y Ceniza Volante

Cokca (2001), explica que la estabilización de los suelos tratados con cenizas volantes es el resultado de intercambio de catión entre las partículas de arcilla y aluminio (Al<sup>3+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>) y hierro (Fe<sup>3+</sup>) en las cenizas volantes. Se describe el proceso de estabilización indicando que las cenizas volantes pueden proporcionar una adecuada matriz de cationes divalentes y trivalentes que bajo condiciones ionizadas origina la floculación de dispersión de las partículas de arcilla.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el suelo arcilloso, las características de compactación (densidad y óptimo contenido de humedad) de los suelos cambian. El proceso de hidratación se produce durante el contacto entre el suelo, la ceniza y el agua hace que la unión y cementación generen altos valores de densidad.

Todos los mecanismos de estabilización están relacionados con un cambio químico o proceso.

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en éstas, depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

Una concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras.

Muchos investigadores han estudiado el mecanismo que contribuye al proceso de estabilización de suelos tratados con cenizas volantes.

Acosta (2003), Existen tres mecanismos principales contribuyendo a la estabilización. El primero es que la resistencia del suelo aumenta como resultado de la cementación producida a partir de la hidratación de aluminato tricálcico presentes en las cenizas volantes. Otro mecanismo es que la cal libre (CaO) en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla, causando compresión de la capa de absorción y la reducción en la plasticidad. Finalmente, la cal libre que no hace reaccionar con los minerales de arcilla se encuentra disponible para el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica con los compuestos de sílice y alúmina.

Las cenizas volantes tradicionales se caracterizan por su bajo contenido de cal y alto contenido de sílice, por lo que su utilización como estabilizador de suelos requiere la

adición de un agente activador rico en cal. El agente activador provee la cal necesaria para que se produzca la reacción puzolánica, mientras que la ceniza provee los compuestos puzolánicos, sílice y alúmina

Rico y del Castillo (1998), existen dos diferencias de estabilización con cal hidratada y cemento. En primer lugar, la cal tiene un espectro de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos y en contra partida se extiende algo menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza friccional.

En segundo lugar, está el uso cada día más extendido que se hace de la estabilización de cal como un pre-tratamiento.

La forma más usual de emplear la cal en las estabilizaciones es la hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. Los carbonatos de calcio no tienen virtudes estabilizantes dignas de mención. La cal viva se utiliza con frecuencia en pre-tratamientos de suelos húmedos. El efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forman por acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores.

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo:

- La primera es la inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo a causa del incremento de concentración de cationes en el agua a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto pH de la cal.
- La segunda reacción tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propia mente cementante; aunque no es completamente bien conocida, se atribuye a una interrelación entre los iones calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; de hecho esta última reacción puede reforzarse añadiendo al suelo cenizas ricas en sílice.

La reacción cementante tiene a lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto, la estabilización con cal difiere mucho de la estabilización con cemento.

MTC Manual de Carreteras Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador, que satisface las restricciones y observaciones de cada tipo de suelo.

Tabla 8: Guía Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador

ÁREA	CLASE DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
1A	SW ó SP	(1) Asfalto			
		(2) Cemento Pórtland			
		(3) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1B	SW - SM ó SP - SM ó SW - SC ó SP - PC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		
		(2) Cemento Pórtland	IP no excede de 30		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1C	SM ó SC ó SM-SC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2) Cemento Pórtland	(b)		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		

Fuente: US Army Corps of Engineers

### 2.3.4.1 Agentes Estabilizantes.

Suarez Díaz (2012) las cenizas que contienen compuestos de silica y aluminio, los cuales mezclados con cal y agua forman una masa cementada, las cenizas son el residuo mineral de la combustión del carbón. El diseño con cenizas determina el contenido óptimo de finos que produce la máxima densidad revuelta con el suelo. Se recomienda utilizar inicialmente un contenido de cenizas del 10% y ensayar muestras con contenidos de ceniza entre el 10 y el 20%.

Álvarez J. (2010), la cal en los suelos arcillosos provoca una notable disminución de plasticidad, entrega mayor trabajabilidad en las operaciones de construcción y aporta buenas superficies de trabajo para los equipos de construcción. El cemento también es un agente estabilizante y se utiliza en una mezcla íntima con el suelo, convenientemente pulverizado con determinadas proporciones de agua y cemento se compacta y curan para obtener mayor densidad. Cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de

suelos, sin embargo, el mayormente empleado es el Tipo I, además es el que permite a la mezcla de suelo – cemento alcanzar mayor resistencia por su contenido de aluminato tricalcico y sulfato de calcio. Asimismo es usado el asfalto que es una mezcla íntima de emulsión asfáltica, suelo fino, arena o grava natural de granulometría similar o parecida a aquella de sub-base, agua y a veces aditivos, conformado un producto que se utiliza en capas de base para carreteras

### **2.3.5 Cal**

#### **2.3.5.1 Generalidades sobre la cal**

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas a temperaturas entre 880 y 900°C, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La adicción de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor y menor grado, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y el CBR. (Hueso Maldonado & Orellana Martinez, 2009)

#### **2.3.5.2 Los diferentes tipos de cal**

La palabra cal es un término general con el que se designan formas físicas y químicas de las diferentes variedades en que pueden presentarse los óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio. A efectos de clasificación se distinguen los siguientes tipos de cal: (Sanpedro Rodríguez, 1997)

#### **2.3.5.3. Cales aéreas**

Cales que se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%.

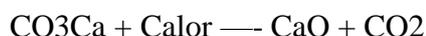
#### 2.3.5.4. Cales hidráulicas

Endurecen en contacto con el agua. Obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (Sílice y Alúmina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

#### 2.3.5.5. Cales utilizadas para la estabilización de suelos

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son CALES AÉREAS. Estas presentan las siguientes formas:

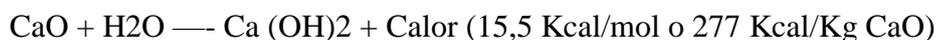
- CALES VIVAS: Son cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio producidas por calcinación de la caliza.



Se comercializan en grano (diferentes granulometrías) o molidas, incluso micronizadas. En contacto con el agua se hidratan siendo la reacción fuertemente exotérmica. Cuando se utilizan calizas que también contienen en su composición carbonato de magnesio, una vez calcinadas se obtienen a la vez óxidos de calcio y de magnesio. Si el porcentaje de óxido de magnesio es  $> 5\%$ , la cal se denomina cal dolomítica o dolomía calcinada.

NOTA: Hay que tener en cuenta en la estabilización de suelos que el apagado de la cal dolomítica es más lento que el de la cal viva con porcentaje de óxido de magnesio  $< 5\%$

- CALES APAGADAS O HIDRATADAS: Son cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio. Proviene de la hidratación controlada de cales vivas.



No dan reacción exotérmica en contacto con el agua y se comercializan en forma de polvo fino y seco o en lechada de cal (suspensión de agua y cal).

- **CAL EN FORMA DE LECHADA:** Es la suspensión de cal apagada en agua. También puede obtenerse a partir de la cal viva que al mezclarla con agua dará cal apagada, formándose a continuación con el resto del agua la suspensión de lechada de cal. La proporción de cal apagada es tal, que tiene la apariencia de la leche, (150 a 400 g de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por litro de agua). La cal puede ser utilizada bajo forma de lechada de cal en el tratamiento de los suelos cuando se quieran conseguir las siguientes ventajas:
  - ✓ Supresión del polvo producido en el extendido de la cal
  - ✓ Humidificación de los suelos secos.

La lechada de cal puede ser preparada en la propia fábrica o in situ, en depósitos o cubas equipadas de un sistema de agitación, a partir de cal viva o de cal apagada. Una vez preparada la misma, ésta se aplica directamente sobre el suelo.

Para el tratamiento de suelos se puede utilizar: cal viva (óxido de calcio –  $\text{CaO}$ ), cal hidratada (hidróxido de calcio –  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) o una lechada de cal (es una suspensión de cal hidratada en agua, que puede elaborarse a partir de cal hidratada o de cal viva)

El uso vial más importante de la cal es el de estabilizar suelos, para estos fines se emplea la cal hidratada en polvo, que viene envasada en bolsas de papel facilitando de esta manera su manipuleo y transporte.

#### **2.3.5.6. La cal como solución**

En la construcción de carreteras, el aprovechamiento de los suelos naturales de la traza puede presentar dificultades debido a:

- ✓ El alto contenido de agua,
- ✓ La presencia de arcilla en los mismos,
- ✓ A la combinación de ambos elementos.

La importancia del contenido de agua es conocida por todos ya que, si es demasiado elevado, hace que la circulación de máquinas en obra sea difícil cuando no imposible y si es demasiado bajo la compactación resulta una operación difícil. Los materiales que tienen arcillas en su composición, son conocidos por su mediocre propiedad geotécnica que, además, varían según las condiciones climáticas. (Sanpedro Rodriguez, 1997)

La cal aporta una solución interesante a la vez de económica a estos problemas, ya que:

- ✓ La aportación de cal permite secar los suelos excesivamente húmedos.
- ✓ Utilizándola en sus diferentes formas (viva, hidratada o en lechada), mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.
- ✓ Permite utilizar los suelos de la traza reduciendo o evitando el impacto ambiental debido a la extracción de otros suelos o al vertido de los procedentes de las excavaciones de la traza

#### **2.3.5.7. Acción sobre los suelos arcillosos**

Los efectos de la cal sobre los suelos arcillosos pueden ser divididos en dos grupos principales:

- a) Debidos a reacciones rápidas (minutos/horas); es una estabilización por modificación.
- b) Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); pueden asimilarse a una estabilización por cementación.

Como consecuencia de los anteriores efectos, la acción de la cal produce un notable incremento de la resistencia y rigidez del suelo que pierde plasticidad y ductilidad. La permeabilidad del suelo, que inmediatamente después del tratamiento podría ser considerado como un árido maleable que va cementando progresivamente con el tiempo, aumenta considerablemente a corto plazo, pero progresivamente decrece a medida que van teniendo lugar las reacciones de cementación y por tanto, se reduce la susceptibilidad al agua en gran manera, lo que es puesto en evidencia por las modificaciones del Índice de Plasticidad y de la retracción e hinchamiento del suelo. (Sanpedro Rodriguez, 1997)

### 2.3.6 Origen y Proceso de Obtención de Ceniza Volante

El problema originado por la masiva utilización del carbón, en la producción de energía eléctrica se basa en su combustión que origina residuos sólidos constituidos mayormente por la materia incombustible presente en este material; este puede representar entre el 6 y el 20% del carbón alimentado a la central termoeléctrica. Las cenizas volantes se originan cuando se lleva a cabo el proceso de combustión del carbón pulverizado, utilizado como combustible, en las centrales térmicas.

Su composición química y mineralógica depende principalmente del contenido de minerales no combustibles que posee el carbón, y de las reacciones ocurridas durante el proceso de combustión (M.C. Alonso et al. 1995).

La ceniza volante (CV) es la porción más fina, que se separa de la corriente de gases en combustión en la central termoeléctrica entre el caldero u hogar y la chimenea mediante equipos convenientemente diseñados (ciclones, filtros, precipitaciones electrostáticas o una combinación de ellos); si no existieran dichos elementos la ceniza se expandiría a la atmósfera desde la chimenea con lo que resultaría dispersada en amplias zonas geográficas. La otra porción de la materia incombustible del carbón se separa en el cenicero del hogar en forma de escorias. La proporción escoria: ceniza depende del tipo de Caldero u hogar y del carbón (tipo y forma de alimentación), en el caso de una central térmica moderna de carbón pulverizado.

En general, las características físicas de las CV son difíciles de predecir. Las partículas miden entre  $0.5+100\mu\text{m}$  con un tamaño medio entre  $8+30\mu\text{m}$  según la central térmica y los equipos de separación usados; son partículas esféricas de color grisáceo amarillento, más claro si contienen álcalis, y más oscuro si hay carbón inquemado. Los carbones pobres (Lignitos) suelen dar CV muy densas y de color claro. La composición genérica de las CV es la típica de rocas y suelos, estando relacionada con la geología y minería del yacimiento de carbón proveniente, con las condiciones de combustión. En la mayoría de los casos, los óxidos de Si, Al, Fe, Ca y Na suponen el 95 al 99% de la CV aunque también se han identificado hasta 45 elementos que se distribuyen según los tamaños de la partícula. Mineralógicamente hay diferencias importantes según el tipo de carbón que origina las CV. Mientras que el cuarzo y las hematites aparecen en las cenizas de todos

los carbones, las especies magnetita y mullita se presentan más frecuentemente en las de origen bituminoso, mientras que periclasa y CaO son más comunes en los casos de carbones pobres (sub bituminosos y lignitos).

Algunas CV que reúnen unas especiales cualidades de finura y composición, se pueden aplicar como sustituto del cemento en ciertas formulaciones de concreto y morteros, a los que se les exige determinadas resistencias y durabilidad. El carácter puzolánico de las cenizas volantes (reactividad con cal) unido a su gran finura, permite sustituciones de cemento de gran interés técnico y económico, lo cual permite la utilización racional de una gran parte, y son en promedio el 15% de la CV producidas en la preparación de concreto. Otra gran parte de las CV pueden ser consumidas como primera materia en la fabricación del clinker y en los cementos con adiciones.

El carbón llega a la Central Termoeléctrica por medio de barcos de hasta 70,000 toneladas, los mismos que atracan junto a la plataforma de descarga donde dos grúas tipo canguro retiran el carbón sobre la faja transportadora. En su segunda faja transportadora conducen el carbón a lo largo del muelle hasta la cancha de carbón donde es distribuido por medio del apilador de carbón (stacker) para formar las pilas de carbón. La cancha de carbón tiene una capacidad de almacenar hasta 200,000 toneladas. El carbón de la cancha es recogida por dos equipos semi automáticos, que son los recuperadores de carbón (reclaimers), los cuales por medio de una banda de paleta, recogen el carbón de la pila y lo depositan sobre fajas transportadoras, las cuales conducen el carbón hasta los silos de almacenamiento de calderos. Esta operación de cargado de silos hasta el alimentador y luego al pulverizador de carbón donde es triturado y molido hasta convertirse en polvo (70% pasante malla N°200) y luego a través de un flujo de aire templado, es transportado por los tubos hacia los quemadores del caldero, donde las partículas de carbón se encienden formando la llama hogar.

Los gases calientes pasan por el exterior de los tubos del sobre calentador, recalentador y economizador antes de dejar el caldero. Luego pasan por el precipitador electrostático donde queda atrapada la ceniza volante y finalmente son emitidas a la atmosfera a través de la chimenea. Ver Figura 12 Sobre proceso de obtención de Carbón Pulverizado.

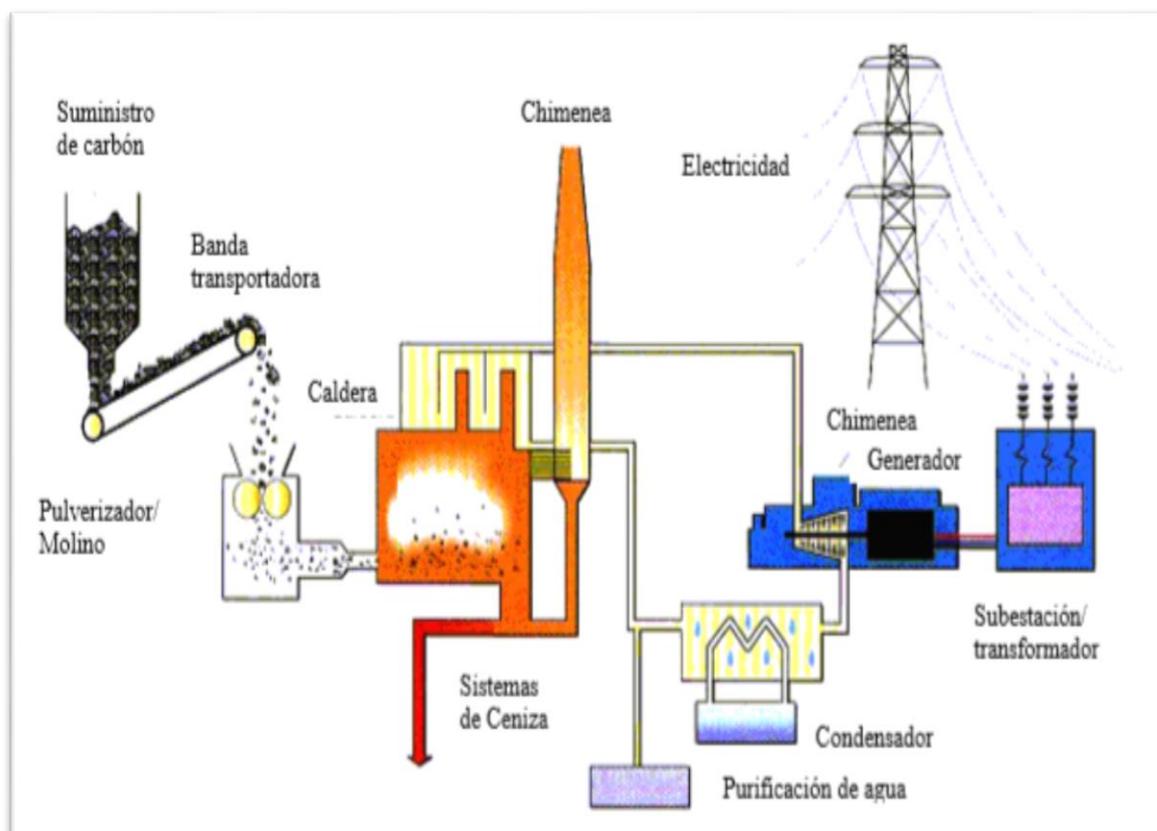


Figura 11 Proceso de Obtención de Carbón Pulverizado

Fuente: Quiroz Bazán Ricardo David. (2005)

EnerSur se constituyó en septiembre de 1996 bajo la denominación social de Powerfin Perú S. A., denominación que cambia en febrero de 1997 a Energía del Sur S. A., EnerSur S. A. como forma abreviada, para adquirir los activos para generación de electricidad de propiedad de Southern Perú Copper Corporation, SPCC, en ese entonces Southern Perú Limited y suscribir el Power Purchase Agreement (PPA).

La Planta posee una turbina a vapor con una potencia nominal de 135 MW, cuenta con una cancha de carbón con capacidad de almacenamiento para 200 mil toneladas y un muelle de 1,250 metros de largo diseñado para buques de 70 mil toneladas de desplazamiento. Dispone de dos plantas desalinizadoras que proveen de agua industrial y potable a la operación de la central y una planta de tratamiento de aguas servidas destinada a la forestación de las áreas circundantes a la central.

Consciente de la necesidad de utilizar adecuadamente los recursos naturales, cuidarlos y preservarlos para las futuras generaciones, Ener Sur S.A. tiene como meta prevenir y mitigar los efectos ambientales que pudieran causar la producción y transmisión de la

energía eléctrica. Ener Sur S.A. cuenta con un plan de manejo ambiental orientado a un estricto cumplimiento de los requisitos legales relacionados a sus actividades y a otros que las empresas de SUEZ Energy International en el Perú adopten, para lo cual cuentan con la certificación ISO 14000. (Quiroz, 2005)

Algunas de las acciones que Ener Sur S.A. viene realizando para el cuidado y preservación del medio ambiente son:

– Uso y tratamiento del agua de mar – Tratamiento de las aguas servidas. – Proyecto de forestación. – El precipitador electrostático, el cual atrapa casi el 100% de las partículas de ceniza volante que acompañan a los gases de combustión del caldero; es decir limpia estos gases antes de su salida a la atmósfera, evitando así que el aire se contamine.

El carbón de diseño garantizado contractualmente es el carbón: “PT Adaro de Indonesia”, cuyas propiedades físico químicas del carbón de garantía está dentro del rango de las especificaciones del Estudio de Impacto Ambiental comprometidas por Ener Sur S.A. para la Central Térmica de ILO21. La combustión de carbón pulverizado (PF) es el método usado para quemar carbón para generación eléctrica.

El sistema de preparación del carbón, secado, molienda al tamaño especificado y alimentación del combustible mediante transporte neumático a los quemadores, está completamente integrado con la caldera. El aire que transporta el carbón es una pequeña fracción del aire total de combustión. El resto del aire de combustión es inyectado separadamente y mezclado con el combustible en la cámara de combustión. Las paredes de la cámara de combustión están refrigeradas por vapor. El diseño de la cámara de combustión tiene que suministrar suficiente tiempo de residencia para garantizar una perfecta combustión y enfriar las cenizas volantes por debajo de su temperatura de reblandecimiento evitando su acumulación sobre los intercambiadores de calor.

El carbón es molido, pulverizado e inyectado con aire a la caldera. El carbón pulverizado tiene una gran área superficial, lo cual facilita su combustión en los quemadores. El calor generado es usado para producir vapor a altas presiones y temperaturas para activar las turbinas y generar electricidad. En la actualidad casi toda la electricidad generada en el mundo en plantas térmicas a carbón es producida usando sistemas de carbón pulverizado.

Las emisiones de la combustión de carbón pulverizado pueden ser reducidas mediante tecnologías de limpieza. Los precipitadores electrostáticos y/o filtros de manga pueden remover más del 99% de la ceniza volante de los gases de combustión. Los métodos de desulfurización de gases de combustión pueden remover entre 90-97% de los óxidos de azufre de los gases y pueden convertirlos en yeso para uso en construcción.

El edificio de turbinas está situado con su eje mayor orientado en dirección NO-SE, prácticamente paralelo a la línea de playa. Los ejes de cada caldera y del edificio de turbinas son perpendiculares. Entre el edificio de turbinas y cada caldera se encuentran situados los silos de carbón del tipo cilíndrico cónico, son tres silos por grupo, con sus pulverizadores correspondientes en la parte inferior.

El eje de los precipitadores electrostáticos está a continuación de las calderas, seguido se encuentra la chimenea, con un tubo común para los gases de salida de las dos calderas. Tiene 130 m de altura, 4,95 m. de diámetro interior y es de hormigón con un liner de acero. También se encuentran dentro de esta área los silos de cenizas y de escoria, dotados de una fácil accesibilidad. Ver: Figura 12 Vista General de la Central termoeléctrica ILO 21, Figura 13 Vista interior de Central Termoeléctrica y Figura 14 Vista de los Silos donde se almacena la ceniza volante.



Figura 12 Vista General de la Central Termoeléctrica ILO21

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)



Figura 13 Vista Interior de las Instalaciones de Central Termoeléctrica ILO2

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)



Figura 14 Vista de los Silos donde se Almacena la Ceniza Volante

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

### 2.3.7 Ceniza Volante

Se define a la ceniza volante mediante la norma ASTM C593-95 como el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón en polvo que es transportado desde la caldera por los gases de combustión.

Las características físicas y químicas de las cenizas volantes varían gradualmente dependiendo del método de combustión y forma de las partículas de las cenizas volantes.

De acuerdo con el significado, los carbones procedentes de fuentes diferentes producen diferentes características de combustión y estas diferencias influyen en la eficacia de la ceniza volante como un estabilizador de suelo. Estas diferentes fuentes se pueden

clasificar en carbón sub-bituminoso, bituminoso y de antracita. Cada uno de ellos tiene diferentes propiedades basadas en el contenido de carbón, la dureza y la edad geológica. Este apartado de la norma ASTM C593-95 contiene información básica relacionada con la composición de la ceniza volante, va a ayudar a ilustrar el rango de valores de las propiedades que este material puede tener.

Dos de las principales tecnologías basadas para la generación de energía son: carbón pulverizado (PC), y combustión de fondo fluido (FBC). La tecnología del PC es el método más popular y se refiere a cualquier proceso de combustión que utiliza el carbón molido muy fino en el proceso. En este tipo de sistema, el carbón se procesa mediante la molienda a una consistencia muy fina para la combustión y la ceniza es formada en la cámara de combustión, mientras sucede la combustión carbón, Undeerc (2007).

Este proceso resulta en 65% a 85% de cenizas volantes, mientras que el resto de material es de cenizas de fondo y escorias en la caldera. La tecnología FBC utiliza una caldera de carbón en donde se lleva a cabo la combustión de carbón, mediante la mezcla de carbón con un absorbente como la piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita o material de fondo. Es un método de combustión de bajo costo para la obtención de la energía sobre todo a partir del carbón con alto contenido de azufre en una forma ambientalmente aceptable. La mezcla de material combustible y el fondo se vuelven fluido durante el proceso de combustión para permitir la combustión completa y la eliminación del gas azufre. En este proceso el azufre en el carbón sale como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y se convierte en sulfato cálcico ( $\text{CaSO}_4$ ) Anthony et al., 2003.



### 2.3.8 Clasificación de Ceniza Volante

De acuerdo con la norma ASTM C618, las cenizas volantes se pueden clasificar en dos tipos principales, la clase C de ceniza volante y la clase F. Esta clasificación depende principalmente de los porcentajes de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Los requerimientos químicos de ambas clases de Cenizas Volantes se muestran

en la Tabla 9. Las cenizas volantes de clase C se produce normalmente de lignito o por la combustión del carbón sub-bituminoso. Este tipo de ceniza volante tiene propiedades cementantes y puzolánicas. El término cementante significa que el material se endurece en presencia del agua y el término puzolánico significa que, en presencia de agua, las cenizas volantes reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para producir también compuestos de cemento

Las cenizas volantes clase F se produce a partir de la combustión del carbón de antracita o bituminoso y se considera que solo tienen propiedades puzolánicas.

Tabla 9 Requerimientos Químicos de Ceniza Volante de acuerdo a ASTM C 618

Composición Química		Clase	
		F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Min %	70	50
SO <sub>3</sub>	Max %	5	5
Contenido de Humedad	Max %	3	3
Pérdida por Ignición	Max %	6	6

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

Estas dos clases de cenizas volantes (C y F) se consideran los tipos más comunes de ceniza volante. Sin embargo, como se mencionó antes, los materiales de ceniza volante tienen una amplia gama de propiedades y características que dependen de factores tales como tipo de carbón, proceso de combustión, aditivos, entre otros. Muchas cenizas volantes no pueden caer dentro de estas dos categorías.

### 2.3.9 Propiedades de la Ceniza Volante

De acuerdo con M.C. Alonso et al. (1995) las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades:

1. Capacidad reactiva, lo que las hace aptas para múltiples aplicaciones. Otra de sus propiedades es la puzolánica e hidráulica, aunque se necesita de un período más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.
2. Las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.
3. Las cenizas volantes en los morteros disminuyen las expansiones asociadas a la reacción árido-álcalis, disminuyendo la pérdida por durabilidad.
4. El contenido de agua libre (que no reacciona con el cemento) es mayor en presencia de cenizas volantes a primeras edades, y por lo tanto la porosidad del sistema también será mayor. Sin embargo, dado que las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad, es posible reducir la relación agua / cemento, contrarrestando la mayor porosidad.
5. Las resistencias mecánicas al utilizar cenizas volantes serán menores en las primeras edades, comparadas con las alcanzadas en cementos Portland. Las cenizas actúan como un diluyente inerte, durante el tiempo de incubación de la reacción puzolánica. A edades largas se produce un refinamiento de la estructura porosa debido a la evolución de la actividad puzolánica.
6. La ceniza volante reducen el calor de hidratación en el cemento debido al menor contenido de alita (C3S) procedente del clínker Portland. Este compuesto es el responsable en su mayor parte del calor desprendido durante la hidratación del cemento Portland. La reacción puzolánica también es exotérmica, pero su desprendimiento es progresivo en el tiempo.
7. Las cenizas volantes incorporadas al cemento mejoran su durabilidad en determinados ambientes sulfatados y de agua de mar. Esto se debe a una mayor impermeabilidad y a la reducción en el contenido de portlandita (SC3). Esto último, inhibe la formación de etringita expansiva. El aumento en la impermeabilidad se debe a que los productos formados durante la actividad puzolánica se depositan en el interior de los poros capilares interconectados, dificultando la penetración de los iones sulfato y cloruro.

Este subproducto industrial posee muchas ventajas para ser empleado en la construcción. Al tener un alto volumen de producción garantiza los volúmenes de suministro que se requieren en este sector; se constituye además, en un material con una reactividad tal que en determinadas condiciones puede comportarse de manera similar como lo hace un cemento Portland y al presentarse en estado pulverulento, hace innecesario cualquier tipo de transformación previa a su uso, constituyéndose además en una materia prima viable económicamente Criado et al. (2006). Las cenizas volantes permiten que la industria del concreto utilice grandes cantidades de este material cementante suplementario con el fin de reducir el consumo de cemento Portland por unidad de volumen de hormigón Fernández C.y Vásquez (2008b).

### **2.3.10 Carreteras no Pavimentadas**

Gutiérrez (2010), Son aquellas vías que tienen una capa delgada de asfalto o estabilizadas mediante aditivos, pero que no pasaron por un proceso de pavimentación. El manual de diseño para carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito, ha considerado que básicamente se utilizarán los siguientes materiales y tipos de superficie de rodadura:

- Carreteras de tierra constituidas por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo.
- Carreteras gravosas constituidas por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo de 75 mm.
- Carreteras afirmadas constituidas por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificadas naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo 25mm. o Afirmados con gravas naturales o zarandeadas. o Afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado.
- Carreteras con superficie de rodadura estabilizada con materiales industriales: o Grava con superficie estabilizada con materiales como: cal, aditivos químicos y otros. o

Suelos naturales estabilizados con: material granular y finos ligantes, cal, aditivos químicos y otros (p.26).

Tabla 10: Clasificación de carreteras según su función.

GENÉRICA	DENOMINACION EN EL PERU
RED VIAL PRIMARIA	1. SISTEMA NACIONAL Conformado por carreteras que unen las principales ciudades de la nación con puertos y fronteras.
RED VIAL SECUNDARIA	2. SISTEMA DEPARTAMENTAL Constituyen la red vial circunscrita principalmente a la zona de un departamento, división política de la nación, o en zonas de influencia económica; constituyen las carreteras troncales departamentales
RED VIAL TERCIARIA O LOCAL	3. SISTEMA VECINAL Compuesta por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caminos troncales vecinales que unen pequeñas poblaciones.</li> <li>• Caminos rurales alimentadores, uniendo aldeas y pequeños asentamientos poblaciones.</li> </ul>

Fuente: Manual de Diseño Geométrico para Carreteras DG – 2001

**2.3.10.1. Clasificación de acuerdo a la demanda**

**AUTOPISTAS.** - Carretera de IMDA mayor de 4000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles, con control total de los accesos que proporciona flujo vehicular completamente continuo. Se le denominará con la sigla A.P.

**CARRETERAS DUALES O MULTICARRILES.** - De IMDA mayor de 4000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles; con control parcial de accesos. Se le denominará con la sigla MC (Multicarril).

**CARRETERAS DE PRIMERA CLASE.** - Son aquellas con un IMDA entre 4000-2001 veh/día de una calzada de dos carriles (DC).

**CARRETERAS DE SEGUNDA CLASE.** - Son aquellas de una calzada de dos carriles (DC) que soportan entre 2000-400 veh/día.

**CARRETERAS DE TERCERA CLASE.** - Son aquellas de una calzada que soportan menos de 400 veh/día. El diseño de caminos del sistema vecinal < 200 veh/día se rigen por las Normas emitidas por el MTC para dicho fin.

**TROCHAS CARROZABLES.** -Es la categoría más baja de camino transitable para vehículos automotores. Construido con un mínimo de movimiento de tierras, que permite el paso de un solo vehículo. Según el manual de especificaciones técnicas generales para construcción de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito se distinguen tres tipos de afirmado y su aplicación está en función del IMD

**AFIRMADO TIPO 1:** Corresponde a un material granular natural o grava seleccionada por zarandeo, con un índice de plasticidad hasta 9; excepcionalmente se podrá incrementar la plasticidad hasta 12, previa justificación técnica y aprobación del supervisor. El espesor de la capa será el definido en el presente Manual para el Diseño de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito. Se utilizará en las carreteras de bajo volumen de tránsito, clases T0 y T1, con IMD proyectado menor a 50 vehículos día.

**AFIRMADO TIPO 2:** Corresponde a un material granular natural o de grava seleccionada por zarandeo, con un índice de plasticidad hasta 9; excepcionalmente se podrá incrementar la plasticidad hasta 12, previa justificación técnica y aprobación del supervisor. Se utilizará en las carreteras de bajo volumen de tránsito, clase T2, con IMD proyectado entre 51 y 100 vehículos día.

**AFIRMADO TIPO 3:** Corresponde a un material granular natural o grava seleccionada por zarandeo o por chancado con un índice de plasticidad hasta 9; excepcionalmente se podrá incrementar la plasticidad hasta 12, previa justificación técnica y aprobación del supervisor. Se utilizará en las carreteras de bajo volumen de tránsito, clase T3, con IMD proyectado entre 101 y 200 vehículos día.

Para el caso del porcentaje que pasa el tamiz 75 um (Nº 200), se tendrá en cuenta las condiciones ambientales locales (temperatura y lluvia), especialmente para prevenir el daño por la acción de las heladas. En este caso será necesario tener porcentajes más bajos al especificado que pasa el tamiz 75 um (Nº 200), por lo que, en caso no lo determine el proyecto, el supervisor deberá fijar y aprobar los porcentajes apropiados.

### 2.3.10.2 Requisitos mínimos para afirmado

Para la construcción de afirmados, con o sin estabilizadores, se utilizarán materiales granulares naturales procedentes de excedentes de excavaciones, canteras, o escorias metálicas, establecidas en el Expediente Técnico y aprobadas por el Supervisor; así mismo podrán provenir de la trituración de rocas, gravas o estar constituidos por una mezcla de productos de diversas procedencias.

Las partículas de los agregados serán duras, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, blandas o desintegrables y sin materia orgánica, terrones de arcilla u otras sustancias perjudiciales. Sus condiciones de limpieza dependerán del uso que se vaya a dar al material. Para el traslado del material de afirmado al lugar de obra, deberá humedecerse y cubrirse con lona para evitar emisiones de material particulado, que pudiera afectar a los trabajadores y poblaciones aledañas.

Los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales, deberán ajustarse a alguna de las siguientes franjas granulométricas, según lo indicado en la tabla 11

Tabla 11: Requerimientos mínimos a nivel de afirmado

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	≥ 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	50 % máx.	50 % máx.
CBR (1)	MTC E 132	D 1883	T 193	40 % mín.	40 % mín.
Límite Líquido	MTC E 110	D 4318	T 89	25% máx.	25% máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	T 90	6% máx.	4% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	D 2419	T 176	25% mín.	35% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	-.-	-.-	1% máx.	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-.-	D 4791	-.-	20% máx.	20% máx.

Fuente: Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Además deberán satisfacer los siguientes requisitos de calidad:

- Desgaste Los Ángeles: 50% máx. (MTC E 207)

- Límite líquido: 35% máx. (MTC E 110)
- CBR (1): 40% mín. (MTC E 132)

(1) Referido al 100% de la máxima densidad seca y una penetración de carga de 0.1” (2.5 mm)

### 2.3.10.3 De la SubBase Granular

De acuerdo al MTC Manual de carreteras el material granular para la capa de subbase deberá cumplir los requisitos mínimos. Asimismo se deben cumplir los requisitos de equipos, requerimientos de construcción, control de calidad, aceptación de los trabajos y las consideraciones de CBR mencionadas en este manual para el diseño del pavimento, y que según el caso deberá estar precisado en las Especificaciones del proyecto.

#### Valor Relativo de Soporte, CBR en SubBase Granular

CBR en SubBase Granular	Mínimo 40%
-------------------------	------------

### 2.3.11.5 DE LA BASE GRANULAR

Según MTC Manual de carreteras el material granular para la capa de base deberá cumplir los requisitos de calidad establecidos en la Sección 403 de las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras (EG - Vigente).

Asimismo, se deben cumplir los requisitos de equipos, requerimientos de construcción, control de calidad, aceptación de los trabajos y las consideraciones de CBR mencionadas en este manual para el diseño del pavimento, y que según el caso deberá estar precisado en las Especificaciones del proyecto.

### Valor Relativo de Soporte, CBR en Base Granular

Para Carreteras de Segunda Clase, Tercera Clase, Bajo Volumen de Tránsito; o, para Carreteras con Tráfico en ejes equivalentes $< 10 \times 10^6$	Mínimo 80%
Para Carreteras de Primera Clase, Carreteras Duales o Multicarril, Autopistas; o, para Carreteras con Tráfico en ejes equivalentes $> 10 \times 10^6$ )	Mínimo 100%

#### 2.3.11 Características Climáticas en la Zona de Estudio.

Según el Servicio de Hidrografía Puno, la Región de Puno se caracteriza por ser una zona muy seca y fría, debido fundamentalmente a su ubicación altitudinal, sin embargo, por su cercanía al Lago Titicaca que actúa como un efecto termorregulador, la temperatura del aire, promedio multianual durante el verano oscila alrededor de  $10.5^{\circ}\text{C}$  y durante el invierno entre  $8^{\circ}$  y  $9^{\circ}\text{C}$ ; durante estas temporadas, los valores promedios mensuales multianuales máximos y mínimos son alrededor de  $16.5^{\circ}$  y  $0^{\circ}\text{C}$  respectivamente; sin embargo, se han presentado temperaturas extremas de  $20^{\circ}\text{C}$ . La humedad relativa oscila alrededor del 55% en el verano y entre el 36% y 40% en el invierno.

#### 2.3.12 Diseño del Pavimento

Para la presente investigación se realizará el dimensionamiento del pavimento por el Método USACE, por tratarse de vías rurales de bajo tránsito y donde hay escasez de materiales de canteras que cumplan las especificaciones técnicas; esto mayormente ocurre en zonas de selva. También se puede utilizar el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities) para el diseño del pavimento en función del CBR de la subrasante. A continuación, describiremos los métodos a emplear:

El método USACE consiste en que el valor de CBR se ubica en las abscisas de la 9 luego se traza una recta vertical hasta intersectar con la curva correspondiente que representa

los valores de los Ejes Equivalentes (N18), luego se traza una recta horizontal por el punto de intersección hallada anteriormente hasta intersectar con el eje vertical de la Figura 15 Curva para Diseño de espesores de pavimento y finalmente el punto de intersección hallado anteriormente, es el valor del espesor requerido para el pavimento con capa de rodadura granular en pulgadas.

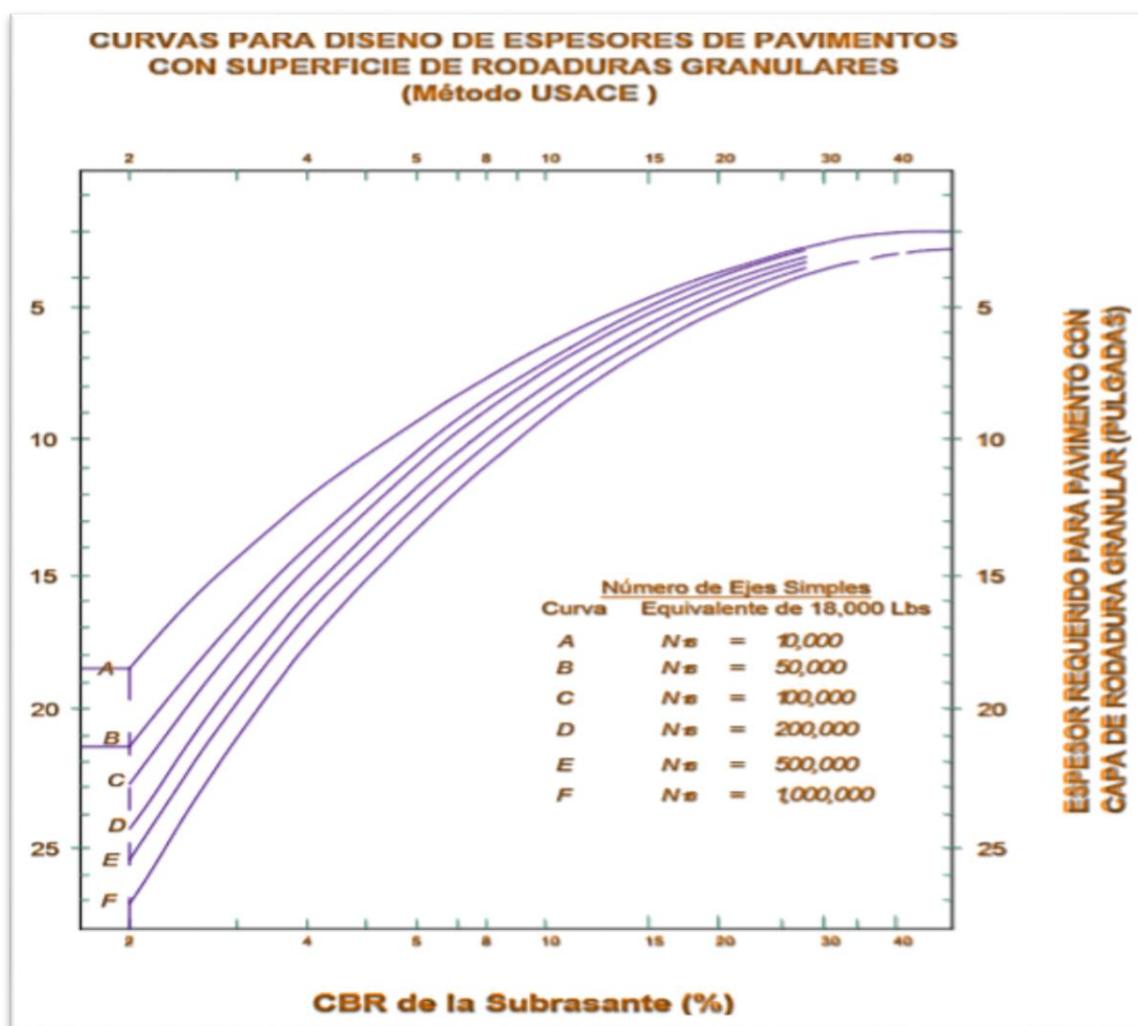


Figura 15 Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008)

Fuente: (MTC, 2008)

El método de diseño de pavimentos NAASRA: Consiste en el dimensionamiento de los espesores de la capa de afirmado, que se adoptó como representativa la siguiente ecuación del método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities (hoy AUSTROADS) que relaciona el valor de soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de EE (ejes

equivalentes). En la Figura 10 se aprecia las curvas para subrasante de acuerdo a los CBR obtenidos de ensayos en la misma y de acuerdo al tráfico ligero, se puede obtener el espesor de la capa de afirmado.

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10} (\text{Nrep}/120)$$

Donde:

- e = espesor de la capa de afirmado en mm.
- CBR = valor de CBR de la subrasante.
- Nrep = número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

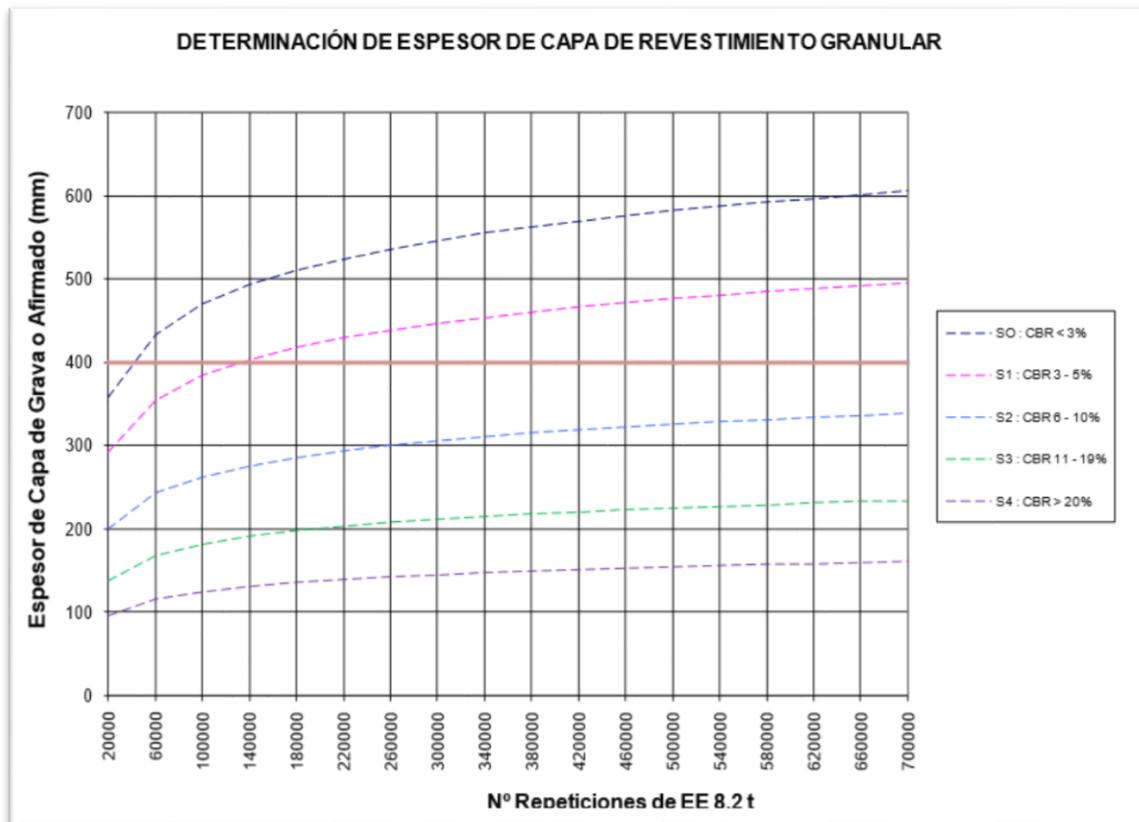


Figura 16 Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento

Fuente: (MTC, 2008)

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos se consideró primero hacer ensayos a la muestra en estado natural (suelo 100%) y luego con la adición de la ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica de Ilo. Se ha considerado adicionar cal en un 5% a todas las dosificaciones propuestas, al suelo natural además de la ceniza volante a fin de obtener mejores resultados.

Los ensayos de laboratorio de evaluación de la mezcla han permitido caracterizar mecánicamente a los materiales. Se ha considerado ensayos de CBR del material natural y de la mezcla de materiales de suelo con arcilla, ceniza volante y cal.

Más adelante se detalla los ensayos que conforman el programa experimental, los materiales utilizados y los métodos empleados para la investigación; así como los detalles de ejecución de las pruebas y equipos utilizados en los ensayos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio fueron realizados, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional del Altiplano.

#### **3.1 Materiales Investigados**

Los materiales utilizados en el presente trabajo son: suelo natural (arcilla), cenizas volantes y cal, así como la combinación de los mismos en diferentes proporciones. El suelo arcilloso natural se obtuvo en la cantera Yanahoco. Mientras que la ceniza volante se trajo de la Central Termoeléctrica de Ilo 21, ubicada en Moquegua.

##### **3.1.1 Material de cantera**

Cantera Yanahoco ubicado en la progresiva Km 02+000 de la carretera Dv. Huancané – Chupa del distrito de Huancané, Provincia de Huancané del Departamento de Puno. Luego de obtener las muestras se transportó en un automóvil hasta el laboratorio de mecánica de suelos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad

Nacional del Altiplano de Puno para poder realizar el estudio de las propiedades físicas y mecánicas.

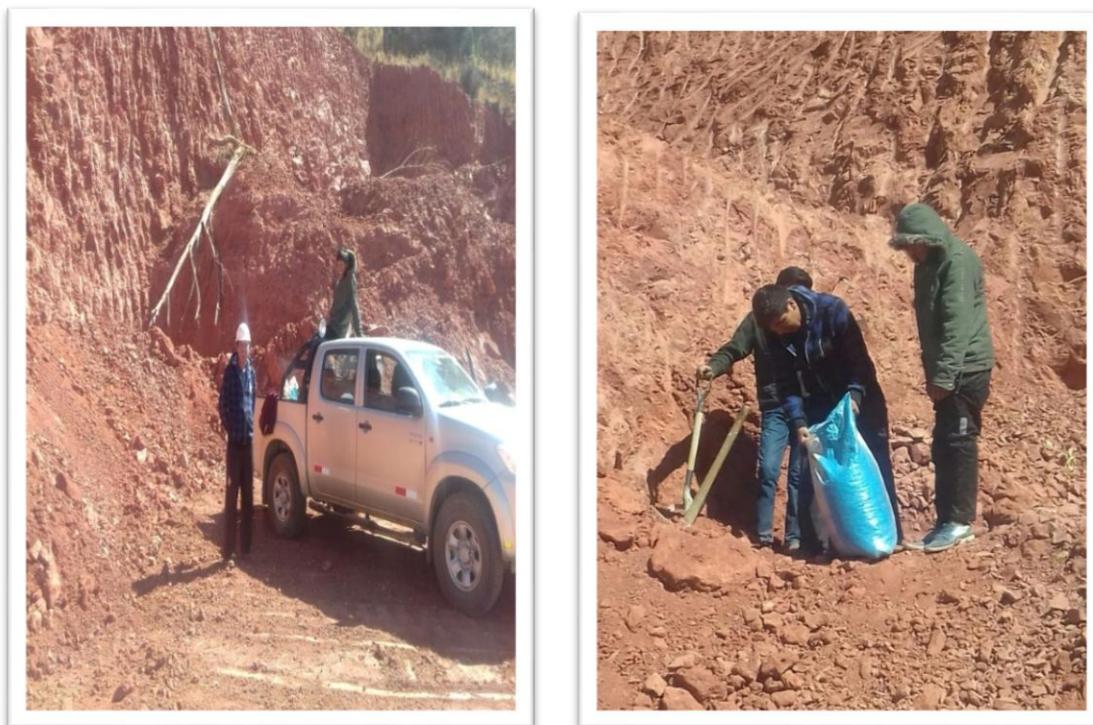


Figura 17 Visita del lugar de obtención de arcilla en la Cantera Yanahoco

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 Ceniza Volante

La recolección de la muestra se realizó en la central termoeléctrica Ilo 21, ubicada en la Región Moquegua, ciudad de Ilo, a 347.5 Km por carretera de la ciudad de Puno. En la Figura 19 Vista de la Planta y Zona de Obtención de Ceniza Volante y Figura 20 Ceniza Volante. Es la única planta en el Perú que opera con carbón y que genera un total de 141.83 MW de potencia efectiva. Las operaciones se inician con la llegada de buques de hasta 70,000 toneladas, que atracan en la plataforma del muelle propio de más de 1 km. Una faja transportadora agiliza las labores y las canchas de carbón acopian 200,000 toneladas. (Quiroz, 2005)

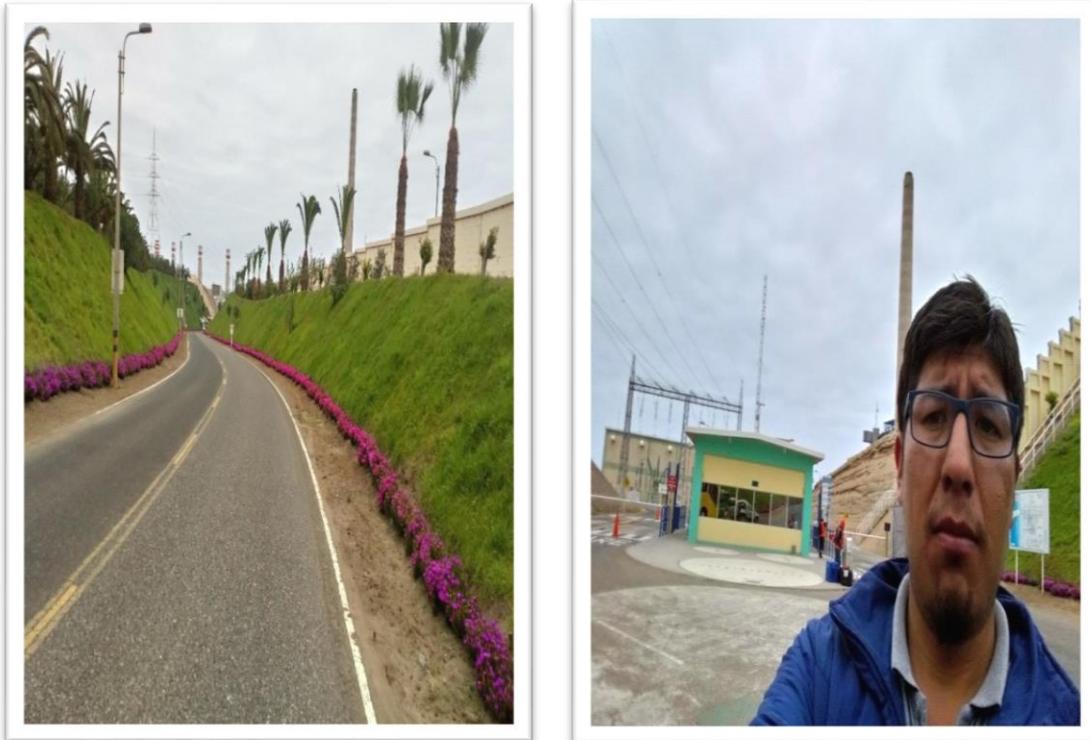


Figura 18 Visita a la central Termoeléctrica Ilo 21

Fuente: Elaboración propia.



Figura 19: Ceniza Volante

Fuente: Elaboración propia.

Entre las tecnologías limpias de carbón para la combustión de carbón pulverizado que reducen emisiones de nitrógeno, se encuentran los quemadores y las técnicas de requemado. Estas modifican el proceso de combustión para reducir emisiones hasta el 50% y están siendo ampliamente adoptadas, por cuanto ellas pueden ser instaladas en plantas existentes. El método de reducción catalítica selectiva es una tecnología de postcombustión que puede lograr reducciones del 80-90%. Quiroz (2005).

Los carbones más utilizados en la Central Termoeléctrica se encuentran en la Tabla 12

Tabla 12 Carbones Utilizados en la C.T. ILO21

<b>compañía</b>	<b>Adaro*</b>	<b>Carbones del Guasare**</b>	<b>Glencore**</b>	<b>Carbocol**</b>
Mina	Tutupan	Paso Diablo	Singleton	El Cerrejon
Carbon	Envirocal	P. D. Premium	Singleton	D
Puerto de Carga	Banjarmasin	Bulkwayuu	Newcastle	P. Bolivar
Pais de Origen	Indonesia	Venezuela	Australia	Colombia
US\$/t	44.38	47.13	43.08	48.0
US\$/GJ	1.96	1.60	1.50	1.780
Embarque	1	2	3	4

Fuente: Peres Collantes, Rocio (2012)

- El carbón ADARO es el carbón de diseño y según las condiciones contractuales utilizado para el cálculo del consumo específico de calor y cálculo del rendimiento de la unidad.
- Carbones utilizados en la operación de la central, que si bien el costo por unidad másica es mayor que el ADARO, el costo por unidad de energía es menor, que explica el uso de combustibles

### 3.1.3 La Cal

Según la norma del MTC en su sección 307B Suelo estabilizado con cal específica que la cal que se use para la construcción de Suelo – Cal, puede ser Cal viva o Cal Hidratada y

debe satisfacer los requisitos establecidos en la especificación AASHTO M-216 o ASTM C-977.

La Cal Hidratada de la compañía ECOCAL con sede en Puente Piedra, Lima - Perú. Con las siguientes especificaciones:

Producto	: Cal Hidratada
Nombre comercial	: Ecocal
Nombre Técnico	: Cal Apagada o Hidróxido de Calcio
Fórmula Química	: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Composición	: Hidróxido de Calcio
Descripción del producto	: Polvo blanco fino, de granulometría uniforme.
Usos	: Estabilización de suelos

Características Organolépticas: Olor y sabor característico, cáustico.

Características físico-químicas:

- Calcio Aprovechable como $\text{CaO}$ :	67% - 73%
- Calcio Aprovechable como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :	88.5% - 96%
- Óxido de Magnesio en porcentaje (% $\text{MgO}$ ):	0.27% - 0.56%
- Óxido de Hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ):	0.03% - 0.08%
- Óxido de Silicio (IV) ( $\text{SiO}_2$ ):	0.05% - 1.16%
- pH: 12/14.	
- Retenido en malla 200:	7 % Máx.
- Humedad:	3% Máx.



Figura 20 Muestra de Cal

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.4 Mezcla de Suelo Arcilloso y Ceniza Volante

El suelo arcilloso y las cenizas volantes se secaron en horno y luego se almacenaron en bolsas plásticas. Las mezclas de suelo, ceniza volante y cal se midieron en peso respectivamente de acuerdo a las proporciones indicadas en Tabla 13 Proporción de mezcla y Símbolos Referentes a cada Material

Tabla 13 Proporción de Mezcla y Símbolos Referentes a cada Material.

<b>Material/Mezcla</b>	<b>% de Suelo arcilloso</b>	<b>% de Ceniza Volante</b>	<b>% de Cal</b>	<b>Símbolo</b>
Suelo	100	0	0	S
Mezcla 1	90	5	5	S90/SV5/C5
Mezcla 2	80	15	5	S80/SV15/C5
Mezcla 3	70	25	5	S70/SV25/C5

Fuente: Elaboración propia.



Figura 21 Mezcla de suelo, ceniza volante y cal

Fuente: Elaboración propia.

### 3.14 Mezcla de Suelo Arcilloso y Cal

La cal viva se utiliza con frecuencia en pre-tratamientos de suelos húmedos. El efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forman por acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores.

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo:

La primera es la inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo a causa del incremento de concentración de cationes en el agua a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto pH de la cal

La segunda reacción tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propiamente cementante; aunque no es completamente bien conocida, se atribuye a una interrelación entre los iones calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; de hecho esta última reacción puede reforzarse añadiendo al suelo cenizas ricas en sílice

La reacción cementante tiene a lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto la estabilización con cal difiere mucho de la estabilización con cemento.

### 3.2 Ensayos de Laboratorio a Realizar

Las muestras representativas de arcilla, ceniza volante y la mezcla adicionando cal fueron sometidas a los ensayos siguientes:

Características Físicas:

- Humedad Natural (MTC E 108-ASTM D2216)
- Análisis Granulométrico por Tamizado (MTC E 107-ASTM D422)
- Límites de Atterberg
  - Límite Líquido (MTC E 110-ASTM D4318)
  - Límite Plástico (MTC E 111-ASTM D4318)
  - Índice de Plasticidad (MTC E 111-ASTM D4318)
- Clasificación de Suelos método SUCS (ASTM D2487)
- Clasificación de Suelos método AASHTO (ASTM D3282)

Características Mecánicas:

- Próctor Modificado (MTC E 115-ASTMD1557)
- California Bearing Ratio (MTC E 132-ASTM D1883)

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional del Altiplano, de acuerdo a Normas ASTM. Los resultados de estos ensayos se presentan en el Anexo I.

#### 3.2.1 Ensayos físicos

##### A. Contenido de Humedad

El objetivo es la determinación del contenido de agua en una muestra de suelo expresada en porcentaje, según el procedimiento establecido en las normas ASTM D653-90, NTP 339.127, MTC E 108 – 2000.

### Descripción breve del ensayo

Se toman 3 muestras y se procede al pesado de la muestra húmeda, registrado los respectivos pesos se procede a llevarla en el horno a temperatura constante por 24hrs, luego se procede a sacar las muestras del horno y una vez enfriada la muestra se procede a tomar el peso de la muestra seca y por diferencia de pesos se obtiene la cantidad de agua en la muestra y se calculan los contenidos de humedad respectivos.



Figura 22: Secado de la muestra

Fuente: Elaboración propia.

### **B. Análisis Granulométrico por Tamizado.**

El objetivo ha sido clasificar un suelo según los tamaños de sus partículas, determinar que grupos comprenden a los suelos gruesos y que grupos a los suelos finos, poder estimar si el suelo está mal o bien graduado, según el procedimiento establecido en las normas ASTM D 422, AASHTO T 88, MTC E 107- 2000. De acuerdo al tamaño de las partículas de suelo, se definen los siguientes términos en la Tabla 14:

Tabla 14: Tipo y Tamaño de Partículas

Tipo de Material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 2 mm
Arena	Arena gruesa: 2 mm - 0.2 mm
	Arena fina: 0.2 mm - 0.05 mm
Limo	0.05 mm – 0.005 mm
Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: Manual de Carreteras (MTC, 2013)

## Descripción breve del ensayo

- Se cuartea la muestra seca luego se pesa y registra el peso total de la muestra seca, para que de esta manera se pueda tener una porción representativa del material de cantera, seguidamente se lava la muestra representativa con agua limpia a través del tamiz N° 200, repitiendo esta operación hasta que el agua se observe clara, para luego secar 18 horas la muestra lavada, en el horno a una temperatura de 105°C. Finalmente seca la muestra, se efectúa el tamizado a través del juego de tamices ordenados de forma decreciente, agitando vigorosamente con un movimiento rotatorio horizontal y vertical. Pesar el material retenido en los diferentes tamices, con estos datos se procede la clasificación del suelo y graficar las curvas granulométricas respectivas.



Figura 23: Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado

Fuente: Elaboración propia.

### C. Limite Líquido

El objetivo es obtener el contenido de humedad expresado en porcentaje %, cuando éste se halle en el límite entre el estado plástico y el estado semilíquido, según el procedimiento establecidos en las normas ASTM D 4318 y AASHTO T 89, MTC E 110-2000. Se realizaron el ensayo de Limite Líquido al 0%, 10%, 20%, 30%, de Ceniza Volante y Cal en un 5% (Cte) para cada una de nuestras dosificaciones.

Descripción breve del ensayo

- Se tamiza la muestra seca a través de la malla N° 40 hasta obtener 300 gr. aproximadamente y descartar el material retenido en él. Seguidamente mezclar el material en el envase de porcelana con agua hasta la consistencia de una pasta espesa y suave luego se deja saturar la muestra por 24hrs. Saturada la muestra se colocara el material desde el envase a la Cuchara de la copa de Casagrande, llenando un tercio del total aproximadamente. Usando la espátula se extiende y empareja el material, formando una torta circular de 1 cm. en el punto de máxima profundidad. Con el acanalador se hace una ranura firme a lo largo del diámetro y a través de la línea central de la mezcla contenida en la cuchara, para evitar el desgarramiento del suelo a lo largo de la ranura, se hace varias pasadas. Finalmente se hace girar la manivela a razón de 2 vueltas por segundo; anotar los golpes necesarios para que las paredes de la ranura se unan en el fondo de la misma  $\frac{1}{2}$ " y obtener la humedad de la muestra (W%).

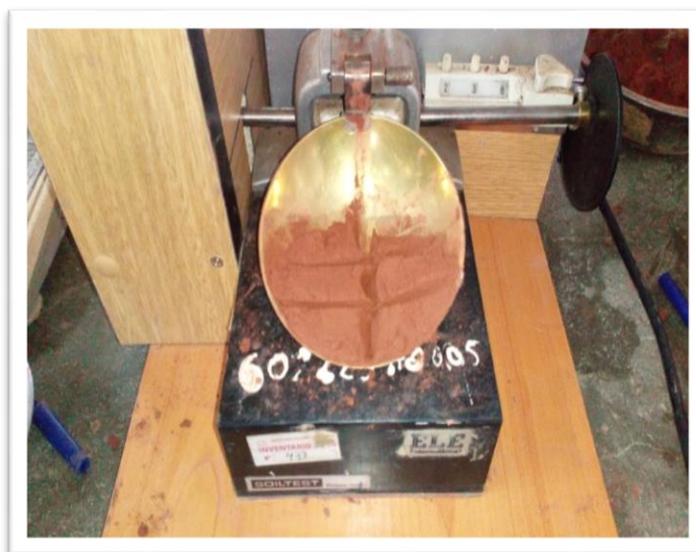


Figura 24: Ensayo de Limite Líquido con la Copa de Casagrande.

Fuente: Elaboración propia.

#### D. Limite Plástico

El objetivo es hallar el contenido de humedad expresado en porcentaje cuando éste se halle en el límite entre el estado plástico y el estado semisólido del suelo, según el procedimiento establecido en las normas ASTM D 424, MTC –E 112-2000. Se realizaron el ensayo de Limite Plástico al 0%, 10%, 20%, 30%, de Ceniza Volante y Cal en un 5% (Cte) para cada una de nuestras dosificaciones.

Descripción breve del ensayo

- Se emplea material usado para el límite líquido, verificando una consistencia tal que pueda ser rolado entre los dedos de la mano y el vidrio esmerilado. Seguidamente se toman aproximadamente dos gramos de material y se forma bastones cilíndricos de modo que lo podamos rodar sobre el vidrio esmerilado para quitarle humedad. Luego se inicia el rolado, a razón de 80 a 90 ciclos por minuto. Finalmente, el limite plástico (humedad), se obtiene al formar bastones de 3.2 mm de diámetro, en el instante en que se forman resquebrajaduras superficiales.



Figura 25: Ensayo de Limite Plástico

Fuente: Elaboración propia.

El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP alto corresponde a un suelo de alta plasticidad. Por el contrario, un IP bajo es característico de un suelo de

baja a nula plasticidad. Sobre todo, esto se puede dar en la clasificación siguiente de la Tabla 15 Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales.

Tabla 15: Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales.

INDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERISTICA
IP > 20	Suelos muy arcillosos
20 > IP > 10	Suelos arcillosos
10 > IP > 4	Suelos poco arcillosos
IP = 0	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Manual de Carreteras (MTC 2013)

### 3.2.2 Ensayos Mecánicos

#### A. Proctor modificad

El objetivo es determinar la máxima densidad seca de un suelo; comprender el término de humedad óptima y la dependencia de ambos factores, según el procedimiento establecido en las normas ASTM D 1557 Y MTC E- 115-2000. Se realizó el ensayo de Proctor Modificado al 0%, 10%, 20%, 30%, de Ceniza Volante y Cal en un 5% (Cte) para cada una de nuestras dosificaciones.

Descripción breve del ensayo

- Se realizó el ensayo para la cantera, para ver las condiciones iniciales del Contenido de Humedad Óptimo y de la Máxima Densidad Seca. Se requiere de 30 kg en promedio de material de ensayo, el cual debe ser secado al aire para un mejor manejo y luego disgregar los terrones de material. Tamizar el material por las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y N° 4. De acuerdo al ensayo previo de granulometría, se seleccionó el método de ensayo a practicar y preparar cuatro puntos de ensayo en peso del material a utilizar. Para nuestra cantera se utilizó el método A. Colocar el material de 2.4 kg en la bandeja y se le adiciono el 6% de agua (respecto al peso de la muestra) para revolverlo manualmente con el material hasta lograr una mezcla uniforme. Dividir la mezcla en cinco partes proporcionalmente iguales y depositar con la cuchara metálica una de ellas en el molde de ensayo correspondiente.



Figura 26: Equipo para el Ensayo Proctor

Fuente: Elaboración propia.

## B. PRENSA C.B.R

El objetivo es determinar el índice relativo de soporte de un suelo en condiciones de densidad controlada (compactado) ó un suelo inalterado, según el procedimiento establecido en las normas ASTM D1883 Y MTC E 132-2000. Se realizó el ensayo de C.B.R al 0%, 10%, 20%, 30%, de Ceniza Volante y Cal en un 5% (Cte) para cada una de nuestras dosificaciones.

Descripción breve del ensayo

- Se inicia el ensayo tomando en el Contenido de Humedad Óptimo, obtenido en el ensayo de Proctor Modificado. Seguidamente se preparan tres muestras secas de 6Kg cada uno y tres moldes de CBR con sus respectivos anillos de extensión (collarin). Preparamos en una probeta una cantidad de agua (óptimo de humedad) determinado para la máxima densidad seca en el ensayo de Próctor. Cantidad de agua que será igual para las tres muestras. Se removió en una bandeja la muestra con el agua hasta lograr una mezcla uniforme y dividirla en cinco partes proporcionales. Luego colocamos dentro del molde el disco espaciador y un papel filtro sobre, este para adicionar muestra y someterlas a una compactación de 56 golpes con el pistón. Quitamos la extensión del molde y enrasamos la muestra con la regla metálica con el borde del

molde y con la parte sobrante depositarla en una tara para su determinación del contenido de humedad.

- Se invierte el molde colocándole previamente un papel filtro y retirar el disco espaciador para luego proceder a registrar el peso de la muestra húmeda. Cargar sobre la muestra el vástago graduable y las placas metálicas de 10 lb y colocar el molde en un tanque de agua en posición horizontal y a nivel, para montar el trípode y el extensómetro para registrar la lectura inicial. Al cabo de 96 horas registrar la lectura final, para calcular la expansión del material. La expansión total registrada se expresa en porcentaje referida a la altura inicial que tuvo la muestra. Al cabo de los cuatro días, extraer los tres moldes sumergidos y dejar drenado el agua libre que queda por un tiempo de 15 minutos, cuidando de no alterar la muestra para luego proceder a la prueba de penetración. Colocar el molde en la prensa con su respectiva sobrecarga, asentar el pistón sobre la muestra, verificando el cero en el extensómetro que mide la penetración para la aplicación de la carga y el extensómetro que va en el anillo para medir la carga. Se inca el pistón a velocidad constante de penetración de 1.27mm/min y se anota las lecturas del dial de carga para penetración de 0.025, 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 pulgadas.



Figura 27: Lectura de la Expansión, Prensa C.B.R

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta e interpreta los resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo con arcilla proveniente de la cantera Yanahoco ubicado en la progresiva Km 02+000 de la carretera Dv. Huancané – Chupa, ceniza volante proveniente de la Central Termoeléctrica de Ilo y mezclas de las mismas adicionando cal 5% de manera constante.

#### 4.1 Resultado de la Clasificación de Suelos

##### 4.1.1 Granulometría

Los análisis granulométricos se realizaron según norma MTC E 107 - 2000.

- Descripción de la muestra: Presenta el 39.10% de finos pasantes de la malla N° 200, 52.00% de arena y 8.9% de grava, color rosado claro.
- Clasificación AASHTO: Materiales granulares, A-6 (1); suelo arcilloso.
- Clasificación SUCS: SC; Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.

Luego del lavado de la muestra se realizó el secado de muestra en el horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas

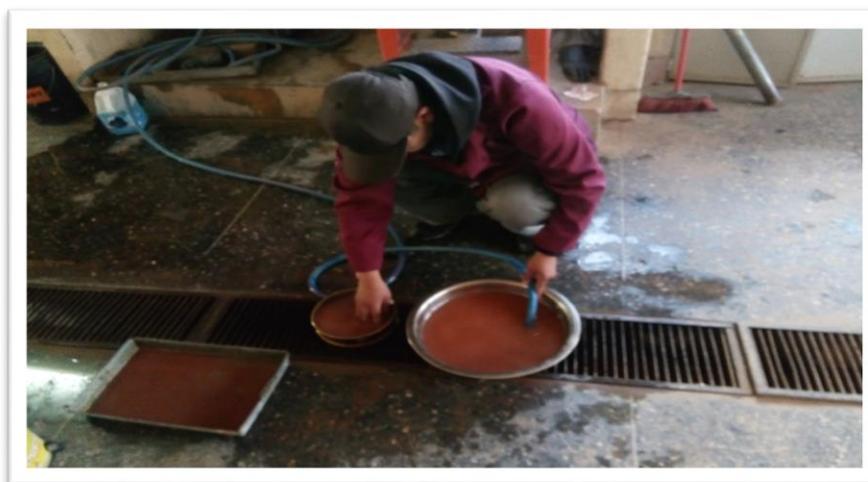


Figura 28 Lavado de muestra de la cantera Yanahoco

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el tamizado después del secado y desmesurado del material de esta cantera por las mallas requeridas para graficar la curva granulométrica, donde este se muestra en la figura siguiente:

A continuación, se muestra la granulometría en la tabla 16 siguiente

Tabla 16: Gradación granulométrica del material de cantera Yanahoco.

<b>N° DE MALLAS</b>	<b>ABERT. DE MALL. (mm)</b>	<b>PESO RETENIDO</b>	<b>% RET. PARCIAL</b>	<b>% RET. ACUMUL</b>
3"	76.200			0.00
2 1/2"	63.500		0.00	0.00
2"	50.800		0.00	0.00
1 1/2"	38.100		0.00	0.00
1"	25.400		0.00	0.00
3/4"	19.050		0.00	0.00
1/2"	12.700	15.66	0.67	0.67
3/8"	9.525	34.00	1.45	2.12
1/4"	6.350	84.38	3.60	5.71
N° 4	4.760	74.79	3.19	8.90
N° 6	3.360		0.00	8.90
N° 8	2.380	193.36	8.24	17.14
N° 10	2.000	43.44	1.85	19.00
N° 16	1.190		0.00	19.00
N° 20	0.840	254.35	10.84	29.84
N° 30	0.590		0.00	29.84
N° 40	0.426	249.20	10.62	40.46
N° 50	0.297		0.00	40.46
N° 80	0.177	269.84	11.50	51.96
N° 100	0.149	21.10	0.90	52.86
N° 200	0.074	188.62	8.04	60.90
-200		917.26	39.10	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Mostramos la curva granulométrica en la siguiente Figura 29

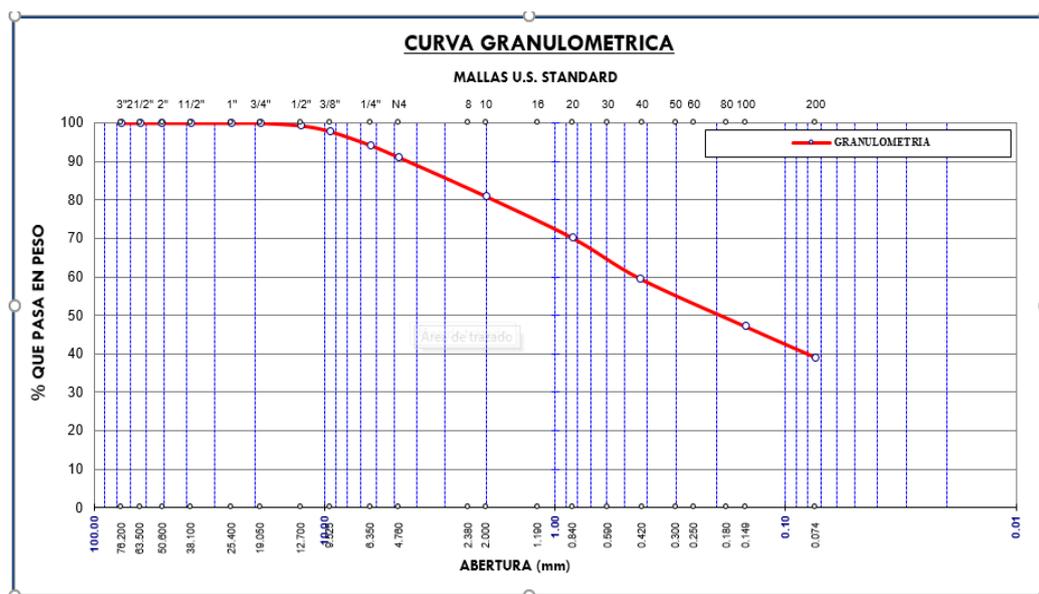


Figura 29 Curva granulométrica, muestra de la Cantera Yanahoco

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Resultado de las Propiedades Índice de Plasticidad y Expansión

### 4.2.1. Límites de Atterberg

Los ensayos para determinar el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), fueron realizados conforme a Norma ASTM D4318. De los resultados se pueden observar que la ceniza volante no presenta plasticidad y nuestro material de la cantera Yanahoco por el IP es un suelo arcilloso.



Figura 30: Ensayo de LL para las dosificaciones de ceniza volante y cal 5% (cte.)

Fuente: Elaboración propia.

A medida que se adiciona la ceniza volante y cal en el suelo arcilloso la mezcla baja el índice de plasticidad a la arcilla. En la Tabla 17, se observan los resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico de la arcilla, ceniza volante y combinaciones.

Tabla 17: Resultados de Límites de Consistencia.

Material/Mezcla	Límites de Consistencia		
	L.L	L.P	I.P
S	23.74	11.3	12.44
S90/CV5/C5	25.39	21.11	4.28
S80/CV15/C5	26.04	21.82	4.22
S70/CV25/5	26.31	22.18	4.13

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras. 31 y 32 se observa la variación de los resultados de los límites de consistencia de la mezcla de arcilla, ceniza volante y combinaciones con cal. También se observa que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante el límite líquido y el límite plástico se incrementa, la humedad de los valores de límites de consistencia e índice plástico.

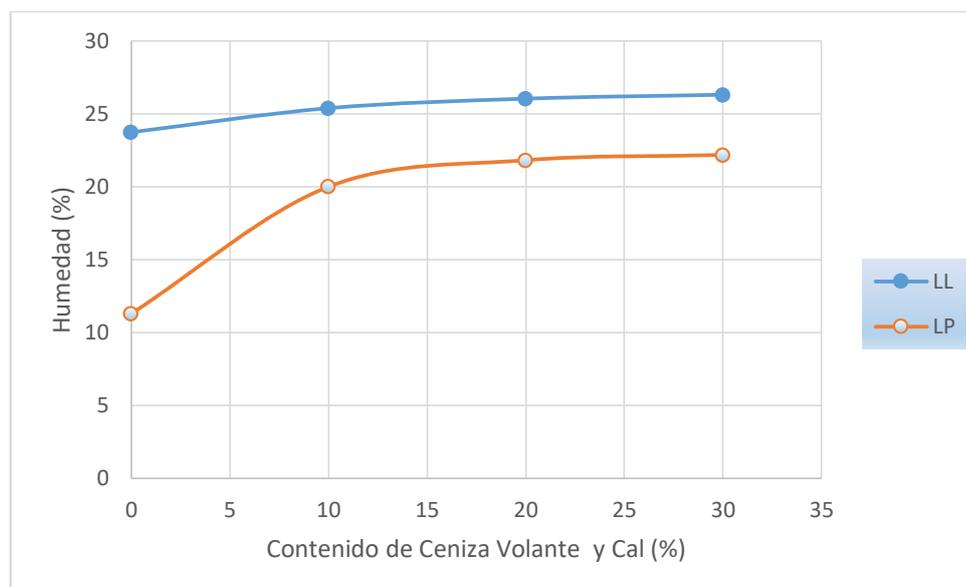


Figura 31: Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de C. V. y Cal 5% (cte.)

Fuente: Elaboración propia.

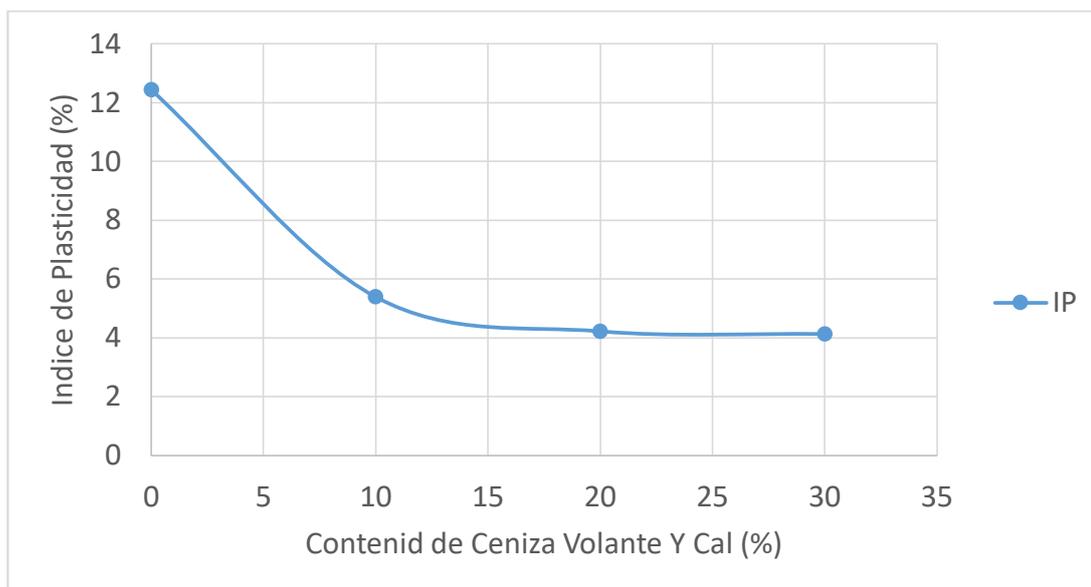


Figura 32 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de C.V. y Cal 5% (cte.)

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Expansión

Los valores de expansión son presentados en las Tabla 18 y la Figura 33 en las que se muestran los materiales y/o mezclas realizadas, podemos observar una disminución considerable de la expansión por lo que el material puede ser utilizado en pavimentos.

Tabla 18: Resultados de la Expansión de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso, C. V. y Cal 5% (cte)

Material/Mezcla	Símbolo	Expansión (%)
Suelo	S	1.67
Mezcla N°1	S90/CV5/C5	0.13
Mezcla N°2	S80/CV15/C5	0.12
Mezcla N°3	S70/CV25/5	0.74

Fuente: Elaboración propia.

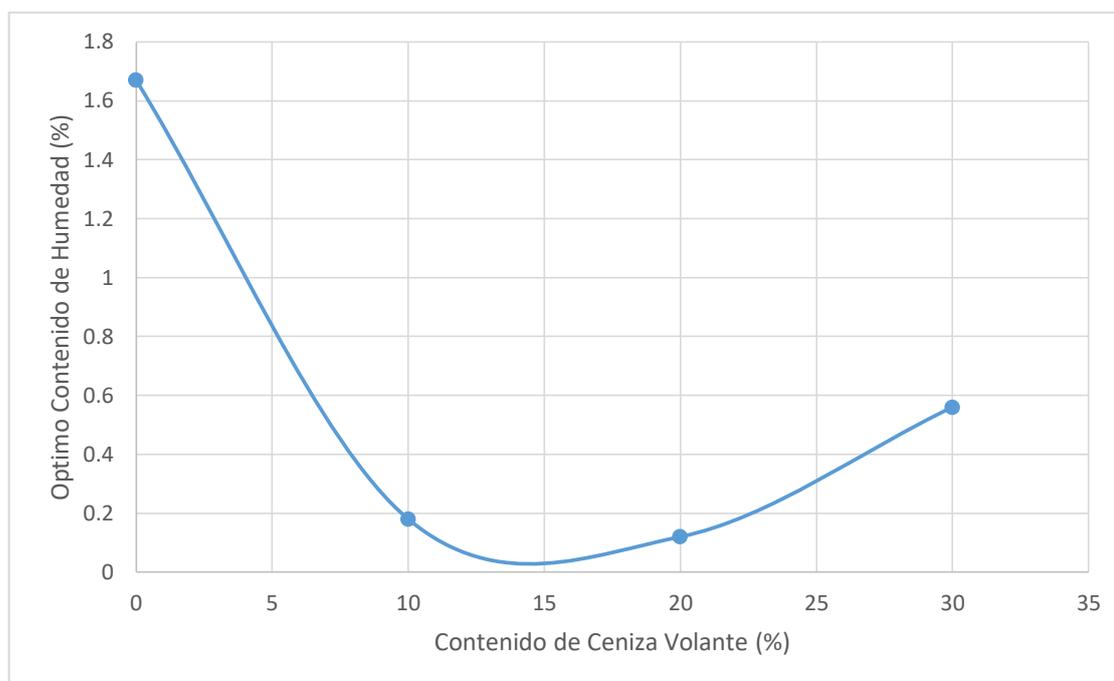


Figura 33: Variación de la Expansión en la Mezcla con Adición de Cal 5% (cte.) y Contenido de Ceniza Volante

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Resultado de las Propiedades Densidad Seca Máxima y Valor de Soporte Relativo

#### 4.3.1 Ensayo de Compactación (Próctor Modificado)

Se presenta los resultados del Ensayo de Compactación (Próctor Modificado) donde se indica valores de Máxima densidad Seca y el Óptimo Contenido de Humedad. En la tabla 19 y en las figuras 34 los gráficos del proctor modificado. De los resultados se aprecia que la máxima densidad seca disminuye con la adición de la ceniza volante y cal 5% (cte.).



Figura 34: Combinación de Suelo, C.V. y Cal 5% (cte) para la compactación de la muestra

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Suelos y combinación con C.V. y Cal 5%

Material/Mezcla	Próctor Modificado	
	Óptimo Contenido de Humedad % (OCH)	Máxima Densidad Seca (MDS)
S	10.45	2.092
S90/CV5/C5	10.12	1.837
S80/CV15/C5	10.03	1.737
S70/CV25/5	9.5	1.694
C.V.	20.9	1.555

Fuente: Elaboración propia.

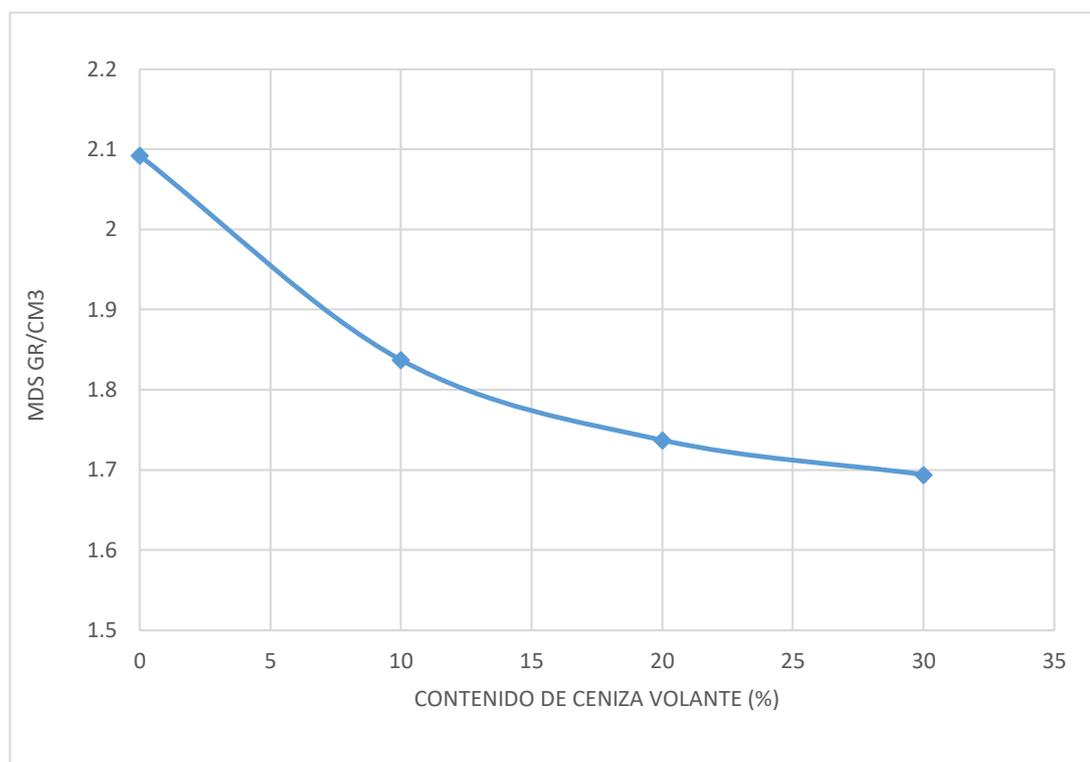


Figura 35: Variación de la M.D.S. con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla, C.V. y Cal 5% (cte.)

Fuente: Elaboración propia.

Para nuestras distintas dosificaciones de Suelo-Ceniza Volante-Cal podemos observar en la figura 35 disminuye su Máxima Densidad Seca (MDS) debido a la baja densidad de la Ceniza Volante y la Cal.

#### 4.3.2 Ensayo CBR

Al término de la compactación se realizó el enrasado y registro de peso de la muestra en prueba para su reacción con el suelo, pasado este tiempo se obtuvo la lectura del deformímetro y luego fue sumergido en la poza con agua durante 96 horas, después de la inmersión fue sometida a prueba de cargas.

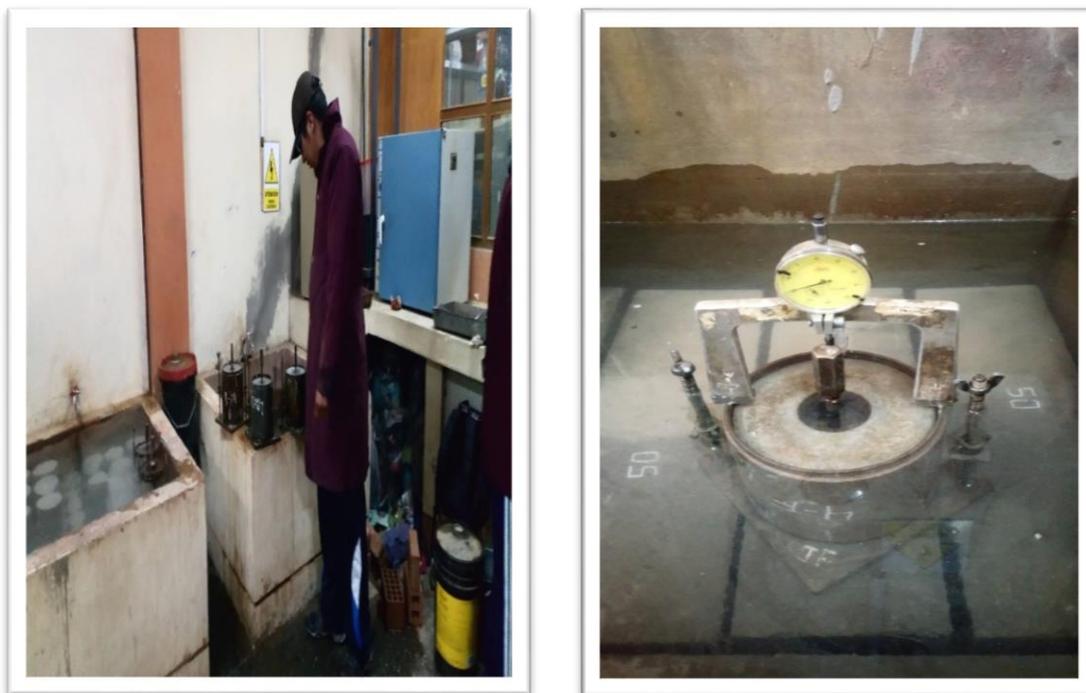


Figura 36: Lectura del deformimetro

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 37 se realizó el ensayo de la Prensa CBR del suelo 100 % y todas las combinaciones con Ceniza volante y cal, luego de haber sometido la muestra a las cargas y sumergido en agua por 96 horas.



Figura 37: Ensayo de CBR

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 20, se presentan los resultados de ensayos de CBR al 100% de la MDS para cada tipo de material y/o mezcla; se observa que el valor de CBR se incrementa notablemente desde 20% correspondiente a un suelo con arcilla (SC) hasta un valor de CBR de 117% para una combinación de material arcilloso en un 80%, ceniza volante en 15% y Cal 5%. Por lo que puede ser usado en pavimentación.

Tabla 20: Resultados del Ensayo de CBR entre Suelo Arcilloso, C.V. y Cal 5% (cte.)

Material/Mezcla	Símbolo	CBR al 100% de la MDS (%)
suelo	S	20
Mezcla N°1	S90/CV5/C5	103
Mezcla N°2	S80/CV15/C5	123
Mezcla N°3	S70/CV25/5	80

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38, se observa el incremento del valor de CBR para los diferentes contenidos de suelo, ceniza volante y cal 5% (cte.) y se puede apreciar que el incremento es mucho mayor.

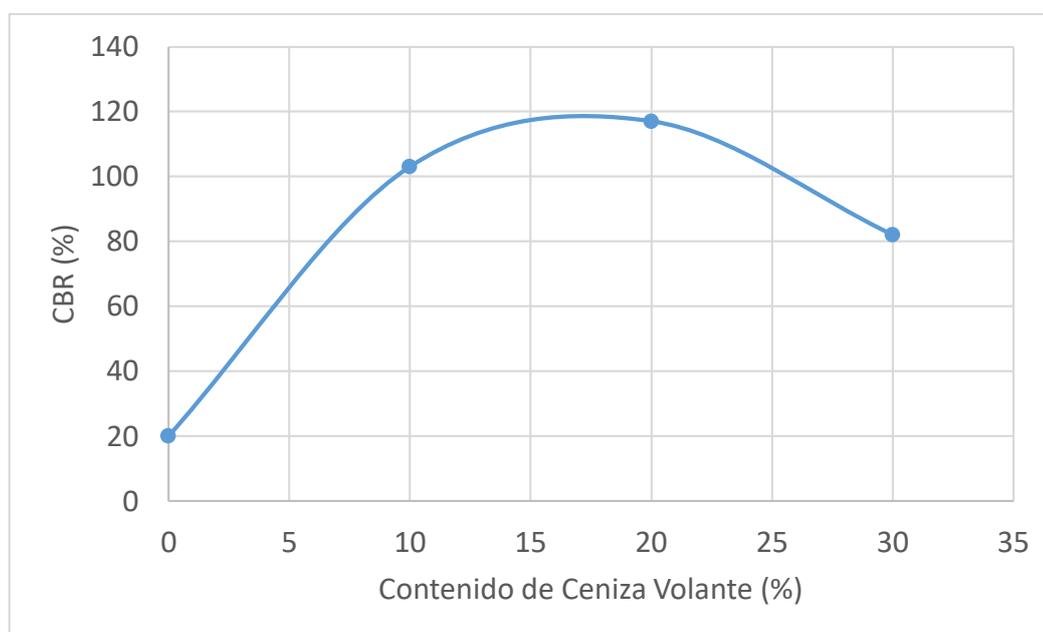


Figura 38: Variación CBR entre Suelo Arcilloso, C.V. y Cal 5% (cte.).

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Comparación del suelo sin estabilizar y estabilizado

En la Figura 38 se puede mostrar el valor del CBR de nuestro suelo con arcilla sin estabilizar es de un 20 % siendo este no apto para la conformación de nuestra sub-base o base de nuestro pavimento a nivel de afirmado. La adición de Ceniza Volante en porcentajes de 5% 15% y 25% y Cal 5% (cte) podemos observar un incremento en el CBR siendo este apto para la conformación de la sub base o base de nuestro pavimento a nivel de afirmado

#### 4.5 Análisis de Costo

Para una cantera ubicada a 20 km de nuestro Proyecto Vial el costo del material de préstamo para la conformación de la Base del Pavimento de 1m<sup>3</sup> es de S/ 30

El análisis de costo de los tipos de mezcla de (Suelo sin ceniza volante y Suelo con diferentes porcentajes de ceniza volante) se hará solo con los materiales que intervienen en la mezcla para 1 m<sup>3</sup>, además se tuvo en cuenta la procedencia de la ceniza volante.

1.- El costo de transporte de la ceniza volante desde la central termoeléctrica Ilo21 hasta la ciudad de Puno es de: 4500 soles para 30 toneladas, entonces el costo por tonelada de transporte es:

$$\frac{4500}{30} = 150 \text{ soles/Tn}$$

2.- El costo de la ceniza volante en la Central Termoeléctrica es: 0.5 dólares por tonelada y considerando el tipo de cambio de: 1 dólar = 3.15 soles, el costo para una tonelada de ceniza más el transporte es:  $150 + 0.5 * 3.15 = 151.58 \text{ soles/Tn}$

3.- Finalmente el costo por kilogramo de ceniza volante puesto en la ciudad de Puno es:

$$\frac{151.58}{1000} = 0.15 \text{ soles/kg}$$

Y la Cal en SODIMAC de 20kg tiene un costo de S/ 12.90:

$$\frac{12.90}{20} = 0.64 \text{ soles/kg}$$

Y el costo comercial de la Cal de 95 kg tiene un costo de S/ 40

$$\frac{40}{95} = 0.42 \text{ soles/kg}$$

Para una proporción S90/CV5/C5 la densidad seca es de 1.982 kg/m<sup>3</sup> entonces 1m<sup>3</sup> tiene en peso W= 1837 kg

El costo del suelo es S/0 debido que se encuentra en el mismo lugar donde se realizara la estabilización y por ser un suelo con malas características físico-mecánicas no tiene ningún Valor monetario.

Material	Cantidad usada	Cantidad equivalente	Costo Unitario kg	Precio
Suelo 90%	0.90 m <sup>3</sup>	1653.3 kg	S/. 0	S/. 0
Ceniza volante 5%	0.05 m <sup>3</sup>	91.85 Kg	S/. 0.15	S/. 13.77
Cal 5%	0.05 m <sup>3</sup>	91.85 kg	S/ 0.42	S/. 38.57
Costo total para 1 m <sup>3</sup>				S/. 52.35

Para una dosificación de S80/CV15/C5 la densidad seca de 1.881kg/m<sup>3</sup> entonces 1m<sup>3</sup> tiene en peso W= 1737 kg

Material	Cantidad usada	Cantidad equivalente	Costo Unitario kg	Precio
Suelo 80%	0.80 m <sup>3</sup>	1389.6 kg	S/. 0	S/. 0
Ceniza volante 15%	0.15 m <sup>3</sup>	260.55 Kg	S/ 0.15	S/. 42.32
Cal 5%	0.05 m <sup>3</sup>	86.85 kg	S/ 0.42	S/. 36.47
Costo total para 1 m <sup>3</sup>				S/. 75.55

Para una dosificación de S70/CV25/C5 la densidad seca de 1.881kg/m<sup>3</sup> entonces 1m<sup>3</sup> tiene en peso W= 1694 kg

Material	Cantidad usada	Cantidad equivalente	Costo Unitario kg	Precio
Suelo 90%	0.70 m <sup>3</sup>	1389.6 kg	S/. 0	S/. 0
Ceniza volante 5%	0.25 m <sup>3</sup>	423.5 Kg	S/. 0.15	S/. 63.52
Cal 5%	0.05 m <sup>3</sup>	84.7 kg	S/ 0.42	S/. 35.57
Costo total para 1 m <sup>3</sup>				S/. 99.09

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y analizados anteriormente se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las propiedades mecánicas del suelo natural si mejoran con la adición de Ceniza Volante y Cal en las dosificaciones planteadas, considerándolo apto para su uso en la conformación de afirmados según EG – 2013.
- El índice de plasticidad y expansión del suelo natural son muy altas, la combinación planteada de Suelo 90%, Ceniza Volante 5% y Cal 5% la plasticidad se redujo al 4% y la expansión 0.13% lo cual es inferior al suelo natural por lo que se puede concluir que se ha podido mejorar este parámetro.
- El valor de soporte relativo de nuestro suelo estabilizado con Ceniza Volante 5% y Cal 5% se obtuvo un CBR de 103 %, considerándolo apto para su uso en la conformación de afirmado según EG – 2013.
- Las propiedades del suelo sin estabilizar SC arenas arcillosas, índice de plasticidad, expansión, densidad seca máxima y CBR no es apto para la conformación de afirmado según EG–2013, para nuestras distintas dosificaciones Suelo - Ceniza Volante - Cal todos los parámetros se han podido mejorar

## CAPÍTULO VI

### RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de ceniza volante para obtener resultados mejores en las propiedades físico-mecánicas del suelo estabilizado y nos permite la reducción de impacto ambiental que este ocasiona.
- Se recomienda la utilización de ceniza volante y cal porque hace posible transformar un suelo con poca capacidad de soporte en un suelo rígido disgregable fácil de manejar y compactar y con una excelente capacidad de soporte.
- Se recomienda a los estudiantes de pre grado de esta Escuela Profesional de Ingeniería Civil realizar la investigación acerca de otros estabilizadores químicos para poder ampliar las alternativas de solución básica en el mejoramiento de suelos.
- Se recomienda profundizar los estudios sobre utilización de ceniza volante en pavimentos, ensayando con otros tipos de suelos.

## CAPÍTULO VII

### REFERENCIAS

- Hausmann, M. (1990)- Principios generadores de la modificación del terreno.- Mc Graw Hill Publishing Company.- U.S.A.
- Kukko, H. "Estabilización de arcilla con subproductos inorgánicos". "Revista de materiales en Ingeniería Civil 2000
- Davidovits, J. (1993). Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement. (P. C. Association) Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrees in the Global Environment
- Sobhan, K., & Mashnad, M. (2003). Mechanical Stabilization of Cemented Soil – Fly Ash Mixtures with Recycled Plastic Strips. Journal of Environmental Engineering
- García-Lodeiro, I., Palomo, a., & Fernández-Jiménez, a. (2007). Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. Cement and Concrete Research.
- Robayo Núñez, Estefania (2013). Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas de carbón volantes activadas alcalinamente. (Tesis de Grado para optar el título de Ingeniero Civil.) Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá – Colombia
- Quijano, J. (2010). Análisis del comportamiento mecánico del cemento hidráulico, adicionados con cenizas volantes provenientes de la Central de Generación Térmica de Termopaipa. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramanga – Colombia
- Rodríguez Martínez, Erich David (2009). Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para producción de sistemas geopoliméricos de cenizas volantes. Universidad Politécnica de Valencia – España. Consultado
- Nardi, J.V., Estabilización de Arena con Gris Volante y Cual; Efecto del cemento como aditivo y de Brita en la mezcla Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 1975.
- Rohde, G.M.; Zwonok, Cenizas de Carbón fósil en Brasil -Aspectos Técnicos y ambientales. Vol 1 Porto Alegre: CIENTEC, (2006)

- Marcon A.F. Durabilidad y Módulo de Elasticidad de Mezclas Arena-Cal-Gris Volante. (Universidad de Buenos Aires), Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
- Umaña-Peña, J. C. Síntesis de Zeolitas a partir de Cenizas Volantes de Centrales Termoeléctricas de Ccarbón. Tesis de Doctorado – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2002.
- Núñez, D. (2011). Elección y dosificación del conglomerante en estabilización de suelos (Tesis de Grado). Instituto Tecnológico de Sonora, Sonora.
- Ravines, M. A. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelo para carreteras (Tesis de Grado), Universidad de Piura, Perú.
- Villalaz, c. Crespo (2004). " Mecanica De Suelos Y Cimentaciones". Mexico: Limusa.
- Gonzales boada, J. (2005). Clasificacion de suelos de acuerdo a Sucs y Aashto. Barcelona: Universidad De Granadas.
- Universidad Catolica Del Norte, C. (2013). Mecanica de Suelos <http://www3.ucn.cl/facultadesinstitutos/laboratorio/aashtom2>
- Braja M., Das. (2001). "fundamentos de ingenieria geotecnica". Mexico: Thomson Learning.
- Cokca, E. (2001) "Use of Class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 568-573. 2001
- Acosta H.A., Edil, T.B., benson, C.H. (2003). "Soil stabilization and drying using fly ash". Geo Engineering Report No. 03-03 Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.
- Suarez Diaz, Jaime (2012). Estabilización de Suelos. Universidad Industrial de Santander – Bucaramanga – Colombia.
- Hueso Maldonado, H. M., & Orellana mArtinez, A. C. (2009). "guia basica para estabilizacion de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador". San salvador: Universidad de El Salvador.
- M.C. Alonso; M. P. de Luxán. Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Experiencia española (1995). Instituto de Ciencias de la Construcción. Eduardo Torroja. Madrid, pág. 12-50.
- Quiroz, R., "Evaluación Energética y Económica de La Central Térmica a Carbón Ilo 21", Tesis para obtener El título de Ingeniería Mecánica / UNI-PERÚ. 2005.

- Choque, H. M. (2012). Evaluación de aditivos químicos en la eficiencia de la conservación de superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas (Tesis de Grado), Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Espinoza, M. (2011). Factibilidad técnica y económica de Perma Zyme para la estabilización de un suelo arcilloso ed la ciudad de talca (Tesis de Grado), Universidad de Talca, Chile.
- Gutiérrez, C. A. (2010). Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas Comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio (Tesis de Grado). Universidad Ricardo Palma, Perú
- Rico, A., y DEL CASTILLO, H. (1974). La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. México: Limusa S.A.
- Roldan de Paz, J. (2010). Estabilización de Suelos con cloruro de sodio (Tesis de Grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala
- FARIAS, Edney Rodrigues de. A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental. Dissertação de MSc., UFSC, Santa Catarina, SC, Brasil. 2005.
- Rico Rodriguez, A., & Del Castillo, H. (2005). " Ingeniería de suelos en las vías terrestres". Mexico: Limusa. Ruano Lopez, D. R. (2012).
- Estabilización De Suelos Cohesivos, Guatemala: Universidad De San Carlos De Guatemala. Universidad Catolica Del Norte, C. (2013). Mecanica de Suelos <http://www3.ucn.cl/facultadesinstitutos/laboratorio/aashtom2>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016). Manual de Ensayo de Materiales (pp. 44, 49, 67, 72, 105 y 248) Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). Manual de Carreteras, Especificaciones Tecnicas Generales para la Construcción (pp. 12 - 14) Perú

# ANEXOS

# Anexo 1

## Ensayo de suelos del material de cantera Yanahoco



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"

**SOLICITADO** : Bach. YUNIOR JOSE HUANCOILLO HUMPIRI

**MUESTRA** : SIN ADITIVO

**FECHA** : 9 de OCTUBRE del 2017

**CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D 2216)**

**DATOS DE LA MUESTRA:**  
**UBICACION :** SIN ADITIVO

Nro De Tara	N-10	PU-4	PU-4	PU-5
Peso de Tara	23.06	18.21	23.17	22.89
Peso de Tara + M. Humeda	99.44	96.03	95.23	95.27
Peso de Tara + M. Seca	94.73	91.57	91.05	91.06
Peso de Agua	4.71	4.46	4.18	4.21
Peso Muestra Seca	71.67	73.36	67.88	68.17
Contenido de humedad W%	6.6 %	6.1 %	6.2 %	6.2 %
Promedio cont. Humedad W%	<b>6.25 %</b>			



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA



LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES

PROYECTO : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"

SOLICITADO : Bach. YUNIOR JOSE HUANCOILLO HUMPIRI

MUESTRA : SIN ADITIVO

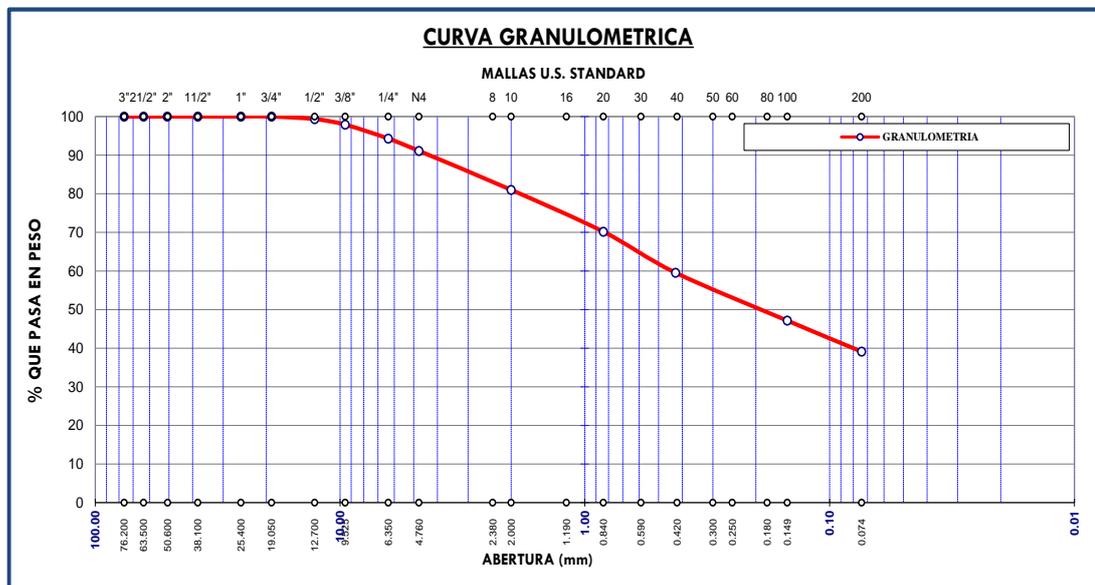
FECHA : 9 de OCTUBRE del 2017

**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO (ASTM D421)**

DATOS DE LA MUESTRA:

UBICACIÓN : YANAHOCO

Nº DE MALLAS	ABERT. DE MALL. (mm)	PESO RETENIDO	% RET. PARCIAL	% RET. ACUMUL	% QUE PASA	ESPECIFICACION	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76.200			0.00	100.00		Peso Inicial : 2346 gr
2 1/2"	63.500		0.00	0.00	100.00		<b>CLASIFICACION DEL SUELO</b>
2"	50.800		0.00	0.00	100.00		Limite Liquido : 23.7%
1 1/2"	38.100		0.00	0.00	100.00		Limite Plastico : 11.3%
1"	25.400		0.00	0.00	100.00		Indice Plastico : 12.5%
3/4"	19.050		0.00	0.00	100.00		<b>CLASIFICACION DEL SUELO</b>
1/2"	12.700	15.66	0.67	0.67	99.33		AASHTO : A-6 (1)
3/8"	9.525	34.00	1.45	2.12	97.88		SUCS : SC
1/4"	6.350	84.38	3.60	5.71	94.29		% de Grava : 8.90 %
Nº 4	4.760	74.79	3.19	8.90	91.10		% de Arena : 52.00 %
Nº 6	3.360		0.00	8.90	91.10		% Pasa Nº 200 : 39.10 %
Nº 8	2.380	193.36	8.24	17.14	82.86		
Nº 10	2.000	43.44	1.85	19.00	81.00		
Nº16	1.190		0.00	19.00	81.00		
Nº 20	0.840	254.35	10.84	29.84	70.16		
Nº 30	0.590		0.00	29.84	70.16		
Nº 40	0.426	249.20	10.62	40.46	59.54		
Nº 50	0.297		0.00	40.46	59.54		
Nº 80	0.177	269.84	11.50	51.96	48.04		
Nº 100	0.149	21.10	0.90	52.86	47.14	2346.00	
Nº 200	0.074	188.62	8.04	60.90	39.10		
-200		917.26	39.10	100.00	0.00		Observaciones :





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



PROYECTO : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
SOLICITADO : Bach. YUNIOR JOSE HUANCILLO HUMPIRI  
MUESTRA : SIN ADITIVO  
FECHA : 9 de OCTUBRE del 2017

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
(LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO ASTM D 4318)**

DATOS DE LA MUESTRA:

UBICACIÓN : YANAHOCO

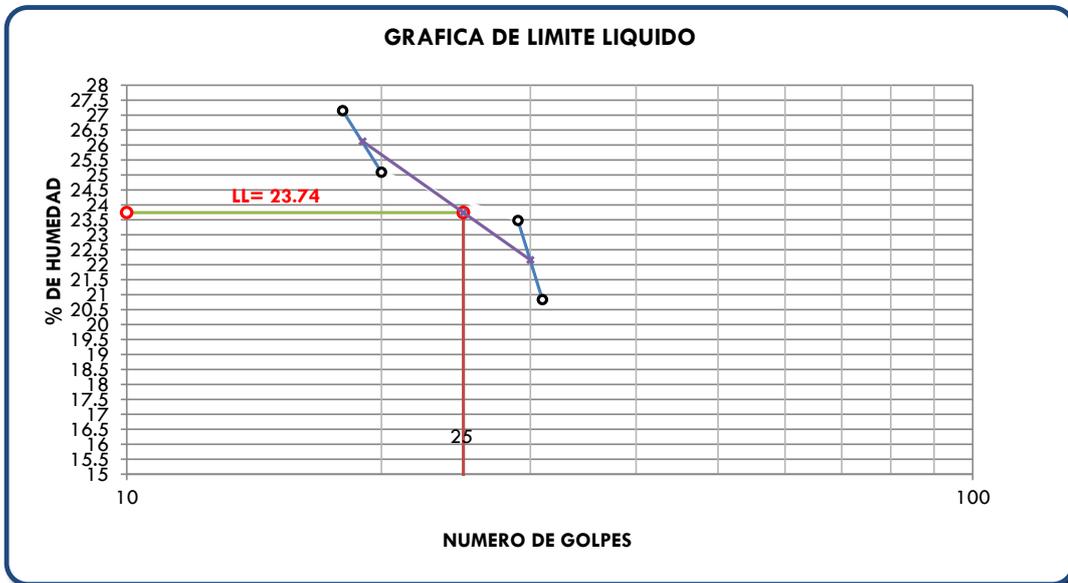
**LIMITE LIQUIDO**

# Tara		A-11	A-33	B-2	A-7
Peso de la Tara	gr.	17.57	19.78	19.95	21.62
T. + Suelo Húmedo	gr.	46.28	49.69	49.45	49.75
T. + Suelo Seco	gr.	40.15	43.69	43.84	44.90
Peso del Agua	gr.	6.1	6.0	5.6	4.8
Suelo Seco	gr.	22.6	23.9	23.9	23.3
<b>% de Humedad</b>		<b>27.1</b>	<b>25.1</b>	<b>23.5</b>	<b>20.8</b>
<b>Nro. De Golpes</b>		<b>18</b>	<b>20</b>	<b>29</b>	<b>31</b>

**LIMITE PLASTICO**

# Tara		ES-01	A-14	ES-2	
Peso de la Tara	gr.	16.7	31.9	19.49	
T. + Suelo Húmedo	gr.	19.6	33.9	22.51	
T. + Suelo Seco	gr.	19.30	33.76	22.18	
Peso del Agua	gr.	0.3	0.2	0.3	
Suelo Seco	gr.	2.7	1.9	2.7	
<b>% de Humedad</b>		<b>12.8</b>	<b>9.7</b>	<b>12.3</b>	

LIMITE LIQUIDO                    L.L. = 23.74 %  
LIMITE PLASTICO                L.P. = 11.3 %  
INDICE DE PLASTICIDAD        I.P. = 12.5 %





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
**SOLICITADO** : Bach. YUNIOR JOSE HUANCILLO HUMPIRI  
**MUESTRA** : S90/CV5/C5  
**FECHA** : 16 de OCTUBRE del 2017

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
(LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO ASTM D 4318)**

DATOS DE LA MUESTRA:

CANTERA : YANAHOCO

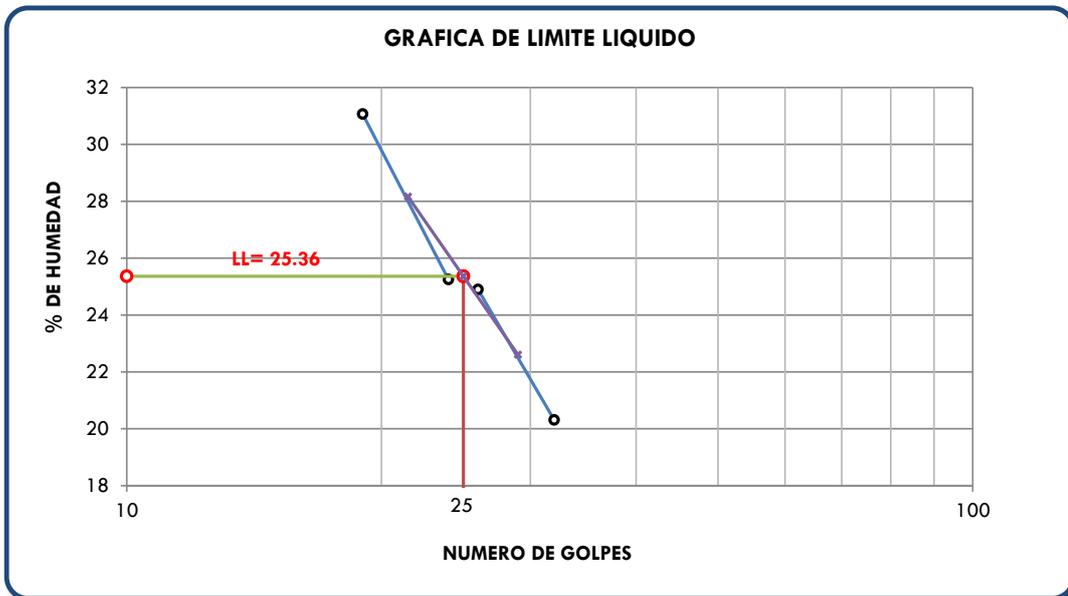
**LIMITE LIQUIDO**

# Tara		A-6	A-33	B-2	A-7
Peso de la Tara	gr.	15.27	10.60	16.61	19.48
T. + Suelo Húmedo	gr.	39.23	30.39	45.60	33.34
T. + Suelo Seco	gr.	33.55	26.40	39.82	31.00
Peso del Agua	gr.	5.7	4.0	5.8	2.3
Suelo Seco	gr.	18.3	15.8	23.2	11.5
<b>% de Humedad</b>		<b>31.1</b>	<b>25.3</b>	<b>24.9</b>	<b>20.3</b>
<b>Nro. De Golpes</b>		<b>19</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>32</b>

**LIMITE PLASTICO**

# Tara		ES-01	A-14	ES-2	
Peso de la Tara	gr.	21.6	25.5	16.24	
T. + Suelo Húmedo	gr.	23.2	27.3	17.93	
T. + Suelo Seco	gr.	22.95	26.95	17.64	
Peso del Agua	gr.	0.3	0.3	0.3	
Suelo Seco	gr.	1.3	1.5	1.4	
<b>% de Humedad</b>		<b>22.0</b>	<b>20.7</b>	<b>20.7</b>	

**LIMITE LIQUIDO**                      L.L. = 25.36 %  
**LIMITE PLASTICO**                    L.P. = 21.1 %  
**INDICE DE PLASTICIDAD**            I.P. = 4.2 %





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
**SOLICITADO** : Bach. YUNIOR JOSE HUANCILLO HUMPIRI  
**MUESTRA** : S80/CV15/C5  
**FECHA** : 16 de OCTUBRE del 2017

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
(LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO ASTM D 4318)**

**DATOS DE LA MUESTRA:**

**CANTERA :** YANAHOCO

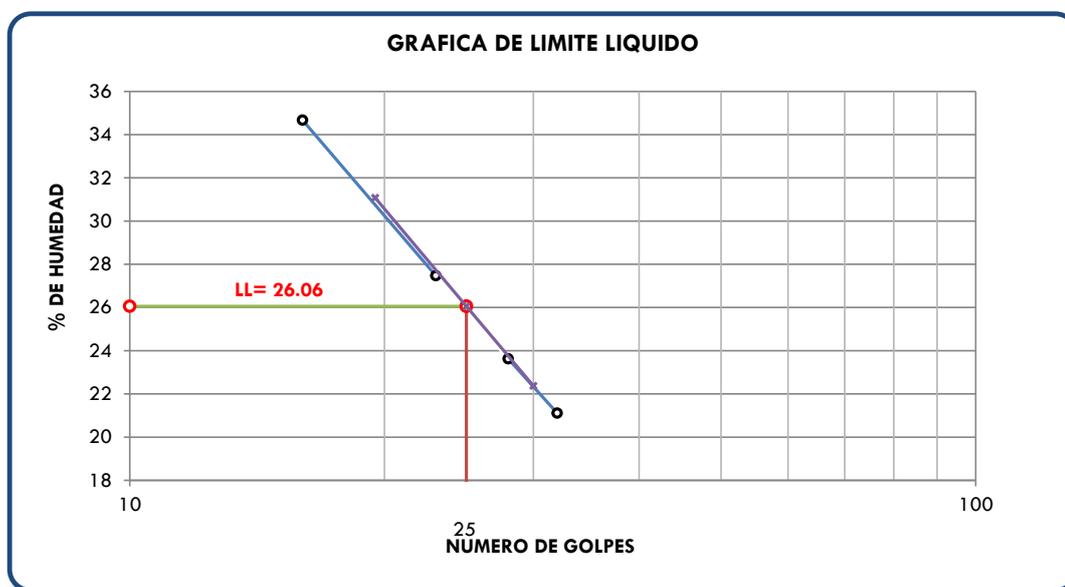
**LIMITE LIQUIDO**

# Tara		A-6	A-33	B-2	A-7
Peso de la Tara	gr.	33.09	16.80	16.46	20.34
T. + Suelo Húmedo	gr.	65.21	44.22	39.53	37.89
T. + Suelo Seco	gr.	56.94	38.31	35.12	34.83
Peso del Agua	gr.	8.3	5.9	4.4	3.1
Suelo Seco	gr.	23.9	21.5	18.7	14.5
<b>% de Humedad</b>		<b>34.7</b>	<b>27.5</b>	<b>23.6</b>	<b>21.1</b>
<b>Nro. De Golpes</b>		<b>16</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>32</b>

**LIMITE PLASTICO**

# Tara		ES-01	A-14	ES-2	
Peso de la Tara	gr.	20.1	15.6	32.46	
T. + Suelo Húmedo	gr.	23.0	18.2	35.41	
T. + Suelo Seco	gr.	22.45	17.80	34.84	
Peso del Agua	gr.	0.5	0.4	0.6	
Suelo Seco	gr.	2.3	2.2	2.4	
<b>% de Humedad</b>		<b>22.3</b>	<b>19.2</b>	<b>23.9</b>	

**LIMITE LIQUIDO** L.L. = 26.06 %  
**LIMITE PLASTICO** L.P. = 21.8 %  
**INDICE DE PLASTICIDAD** I.P. = 4.2 %





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



PROYECTO : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON GENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
SOLICITADO : Bach. YUNIOR JOSE HUANCUILLO HUMPIRI  
MUESTRA : S70/CV25/C5  
FECHA : 16 de OCTUBRE del 2017

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
(LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO ASTM D 4318)**

DATOS DE LA MUESTRA:

CANTERA : YANAHOCO

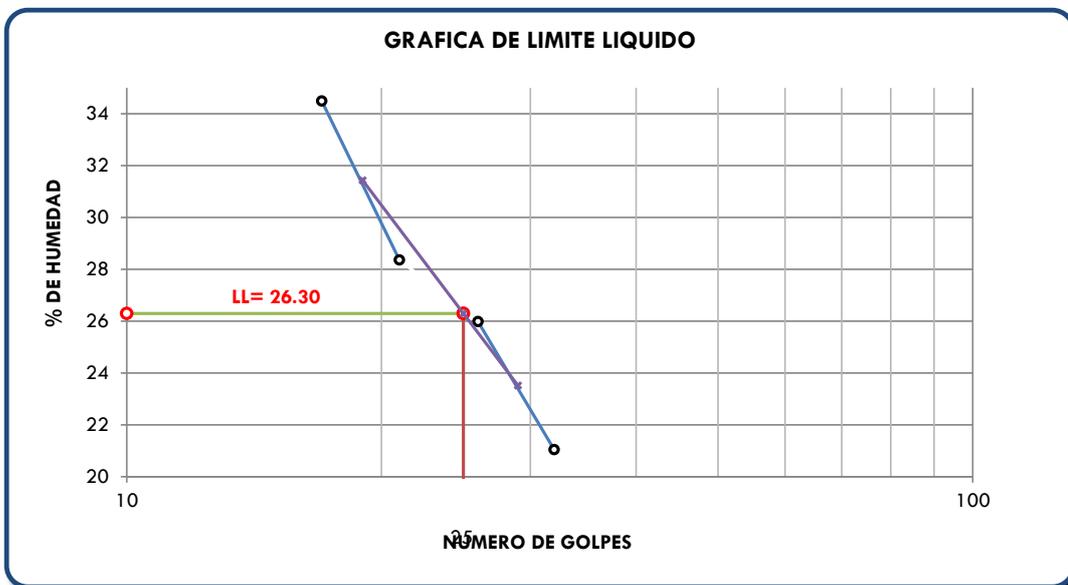
**LIMITE LIQUIDO**

# Tara		A-6	A-33	B-2	A-7
Peso de la Tara	gr.	19.09	10.62	13.82	19.48
T. + Suelo Húmedo	gr.	43.07	34.65	35.78	33.34
T. + Suelo Seco	gr.	36.92	29.34	31.25	30.93
Peso del Agua	gr.	6.2	5.3	4.5	2.4
Suelo Seco	gr.	17.8	18.7	17.4	11.5
<b>% de Humedad</b>		<b>34.5</b>	<b>28.4</b>	<b>26.0</b>	<b>21.0</b>
<b>Nro. De Golpes</b>		<b>17</b>	<b>21</b>	<b>26</b>	<b>32</b>

**LIMITE PLASTICO**

# Tara		ES-01	A-14	ES-2	
Peso de la Tara	gr.	25.1	21.3	36.87	
T. + Suelo Húmedo	gr.	28.5	24.5	39.18	
T. + Suelo Seco	gr.	27.90	23.91	38.77	
Peso del Agua	gr.	0.6	0.6	0.4	
Suelo Seco	gr.	2.8	2.6	1.9	
<b>% de Humedad</b>		<b>21.7</b>	<b>23.4</b>	<b>21.6</b>	

LIMITE LIQUIDO                    L.L. = 26.30 %  
LIMITE PLASTICO                L.P. = 22.2 %  
INDICE DE PLASTICIDAD        I.P. = 4.1 %





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
**SOLICITADO** : HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE  
**CANTERA** : YANAHOCO  
**FECHA** : 22 DE OCTUBRE DE 2017

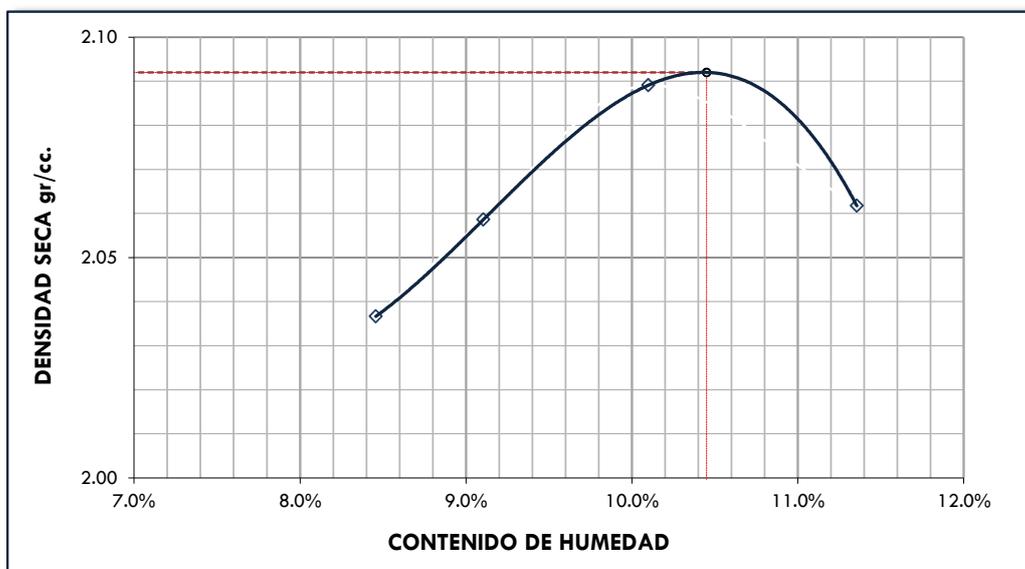
**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**  
**NTP 339.141 , ASTM D 1557**

**DATOS DE LA MUESTRA** SUELO 100%

<b>MOLDE No</b>	1	<b>VOLUMEN DEL MOLDE</b>		943 cc					
<b>No DE CAPAS</b>	5	<b>GOLPES POR CAPA</b>		25					
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	6245	6280	6331	6327				
Peso del Molde	gr.	4162	4162	4162	4162				
Peso del Suelo Humedo	gr.	2083	2118	2169	2165				
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	2.21	2.25	2.30	2.30				
<b>Nº TARA</b>		<b>B-30</b>	<b>B-09</b>	<b>B-29</b>	<b>B-2</b>	<b>T-02</b>	<b>P-1</b>	<b>A-11</b>	<b>PRX-1</b>
Peso de la Tara	gr.	19.52	19.52	16.87	16.87	31.92	31.92	34.17	34.17
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr.	154.56	154.56	206.45	206.45	202.74	202.74	203.91	203.91
Peso del Suelo Seco + Tara	gr.	144.03	144.03	190.63	190.63	187.07	187.07	186.60	186.60
Peso del Agua	gr.	10.53	10.53	15.82	15.82	15.67	15.67	17.31	17.31
Peso del Suelo Seco	gr.	124.51	124.51	173.76	173.76	155.15	155.15	152.43	152.43
Contenido de humedad	%	8.46	8.46	9.10	9.10	10.10	10.10	11.36	11.36
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	%	8.46		9.10		10.10		11.36	
<b>DENSIDAD SECA DEL SUELO</b>	gr/cc	<b>2.037</b>		<b>2.059</b>		<b>2.089</b>		<b>2.062</b>	

**METODO : A**

**MAXIMA DENSIDAD SECA : 2.092 gr/cc**  
**HUMEDAD OPTIMA : 10.45 %**



**OBSERVACIONES:** Muestra proporcionada por el solicitante.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"

**SOLICITADO** : HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE

**CANTERA** : YANAHOCA

**FECHA** : 22 DE OCTUBRE DE 2017

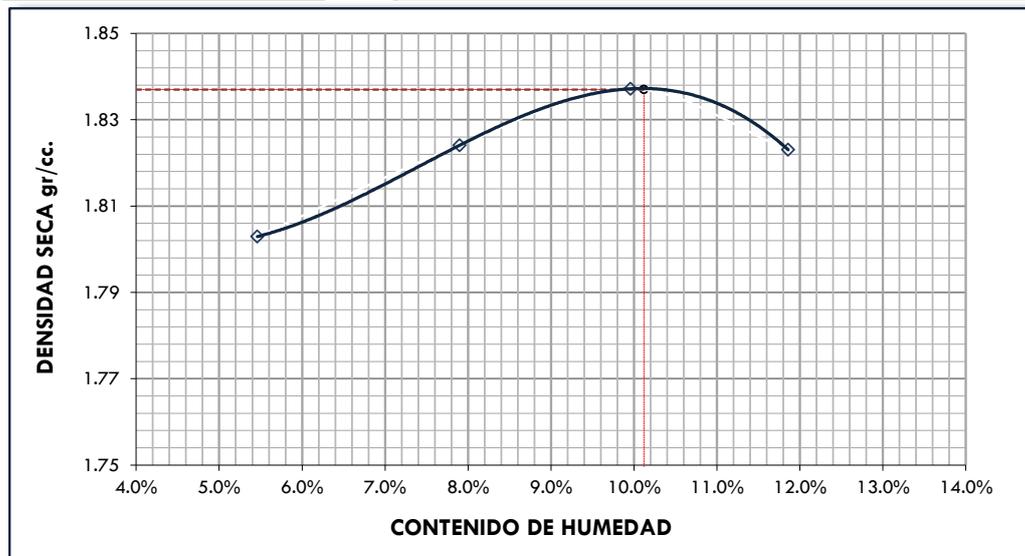
**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**  
**NTP 339.141, ASTM D 1557**

**DATOS DE LA MUESTRA**      S90/CV5/C5

<b>MOLDE No</b>		1		<b>VOLUMEN DEL MOLDE</b>				943 cc	
<b>No DE CAPAS</b>		5		<b>GOLPES POR CAPA</b>				25	
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5955		6018	6067	6085			
Peso del Molde	gr.	4162		4162	4162	4162			
Peso del Suelo Humedo	gr.	1793		1856	1905	1923			
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1.90		1.97	2.02	2.04			
<b>Nº TARA</b>		<b>B-30</b>	<b>B-09</b>	<b>B-29</b>	<b>B-2</b>	<b>T-02</b>	<b>P-1</b>	<b>A-11</b>	<b>PRX-1</b>
Peso de la Tara	gr.	17.15	17.15	29.45	29.45	13.44	13.44	21.54	21.54
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr.	141.80	141.80	154.16	154.16	116.77	116.77	124.87	124.87
Peso del Suelo Seco + Tara	gr.	134.30	134.52	144.33	144.33	106.98	106.98	113.58	113.58
Peso del Agua	gr.	7.50	7.28	9.83	9.83	9.79	9.79	11.29	11.29
Peso del Suelo Seco	gr.	117.15	117.37	114.88	114.88	93.54	93.54	92.04	92.04
Contenido de humedad	%	6.40	6.20	8.56	8.56	10.47	10.47	12.27	12.27
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	%	5.46		7.90		9.96		11.86	
<b>DENSIDAD SECA DEL SUELO</b>	gr/cc	<b>1.803</b>		<b>1.824</b>		<b>1.837</b>		<b>1.823</b>	

**METODO : A**

**MAXIMA DENSIDAD SECA : 1.837 gr/cc**  
**HUMEDAD OPTIMA : 10.12 %**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"

**SOLICITADO** : HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE

**CANtera** : YANAHOCO

**FECHA** : 22 DE OCTUBRE DE 2017

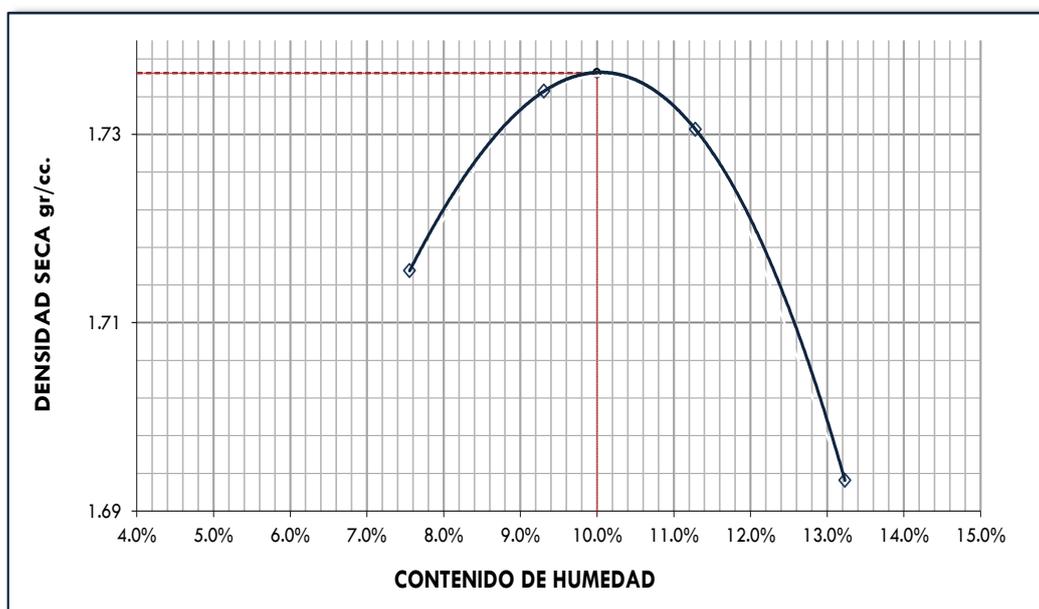
**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**  
**NTP 339.141, ASTM D 1557**

**DATOS DE LA MUESTRA** S80/CV15/C5

<b>MOLDE No</b>	1	<b>VOLUMEN DEL MOLDE</b>		943 cc					
<b>No DE CAPAS</b>	5	<b>GOLPES POR CAPA</b>		25					
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5902	5950	5978	5970				
Peso del Molde	gr.	4162	4162	4162	4162				
Peso del Suelo Humedo	gr.	1740	1788	1816	1808				
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1.85	1.90	1.93	1.92				
<b>Nº TARA</b>		<b>B-30</b>	<b>B-09</b>	<b>B-29</b>	<b>B-2</b>	<b>T-02</b>	<b>P-1</b>	<b>A-11</b>	<b>PRX-1</b>
Peso de la Tara	gr.	14.08	14.08	33.81	33.81	33.20	33.20	43.30	43.30
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr.	103.32	103.32	181.05	181.05	199.31	199.31	209.41	209.41
Peso del Suelo Seco + Tara	gr.	97.05	97.05	168.51	168.51	182.47	182.47	190.00	190.00
Peso del Agua	gr.	6.27	6.27	12.54	12.54	16.84	16.84	19.41	19.41
Peso del Suelo Seco	gr.	82.97	82.97	134.70	134.70	149.27	149.27	146.70	146.70
Contenido de humedad	%	7.56	7.56	9.31	9.31	11.28	11.28	13.23	13.23
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	%	7.56		9.31		11.28		13.23	
<b>DENSIDAD SECA DEL SUELO</b>	gr/cc	<b>1.716</b>		<b>1.735</b>		<b>1.731</b>		<b>1.693</b>	

**METODO : A**

**MAXIMA DENSIDAD SECA** : 1.737 gr/cc  
**HUMEDAD OPTIMA** : 10.00 %



**OBSERVACIONES:** Muestra proporcionada por el solicitante.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



**PROYECTO** : "MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANÉ - CHUPA - PUNO"  
**SOLICITADO** : HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE  
**CANTERA** : YANAHOCA  
**FECHA** : 22 DE OCTUBRE DE 2017

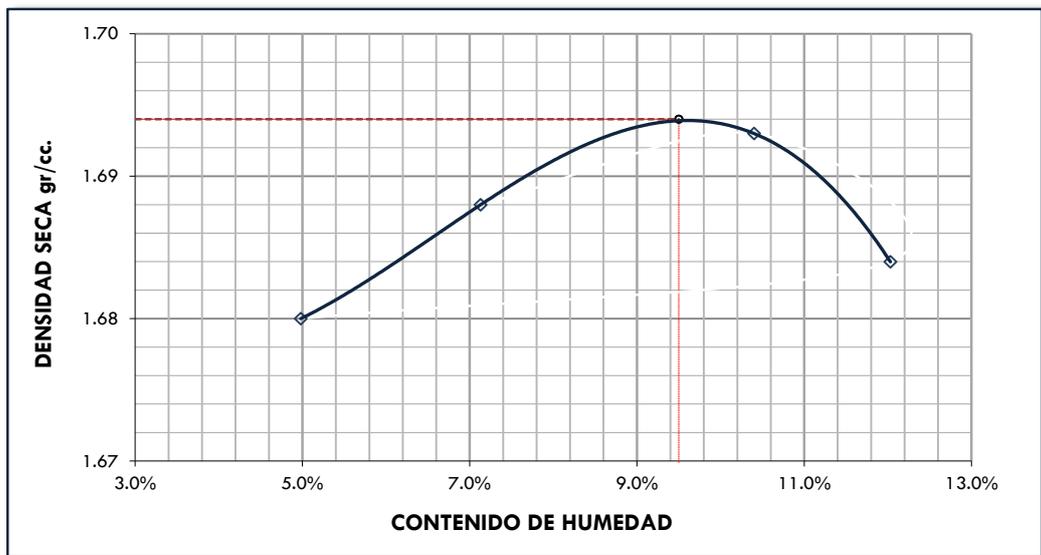
**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**  
**NTP 339.141 , ASTM D 1557**

**DATOS DE LA MUESTRA**      S70/CV25/C5

<b>MOLDE No</b>		1		<b>VOLUMEN DEL MOLDE</b>				943 cc	
<b>No DE CAPAS</b>		5		<b>GOLPES POR CAPA</b>				25	
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5867.27	5924.53	5941.04	5825.13				
Peso del Molde	gr.	4162	4162	4162	4162				
Peso del Suelo Humedo	gr.	1705.27	1762.53	1779.04	1663.13				
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1.81	1.87	1.89	1.76				
<b>Nº TARA</b>		<b>B-30</b>	<b>B-09</b>	<b>B-29</b>	<b>B-2</b>	<b>T-02</b>	<b>P-1</b>	<b>A-11</b>	<b>PRX-1</b>
Peso de la Tara	gr.	19.52	19.52	17.42	17.42	16.07	16.07	19.57	19.57
Peso del Suelo Húmedo + Tara	gr.	128.24	128.24	225.45	225.45	165.33	165.33	166.98	166.98
Peso del Suelo Seco + Tara	gr.	121.00	121.00	205.86	205.86	149.30	149.30	159.99	159.99
Peso del Agua	gr.	7.24	7.24	19.59	19.59	16.03	16.03	6.99	6.99
Peso del Suelo Seco	gr.	101.48	101.48	188.44	188.44	133.24	133.24	140.43	140.43
Contenido de humedad	%	7.13	7.13	10.40	10.40	12.03	12.03	4.98	4.98
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	%	7.13		10.40		12.03		4.98	
<b>DENSIDAD SECA DEL SUELO</b>	gr/cc	<b>1.688</b>		<b>1.693</b>		<b>1.684</b>		<b>1.680</b>	

**METODO : A**

**MAXIMA DENSIDAD SECA : 1.694 gr/cc**  
**HUMEDAD OPTIMA : 9.50 %**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE PROYECTO : Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO		MUESTRA	SUELO 100%
SOLICITANTE: : HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE			
FECHA : 13/11/2017			

MOLDE No	1	2	3
No DE CAPAS	5	5	5
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
CONDICIONES DE LA MUESTRA	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR
			SATURADO
			SIN SATURAR
			SATURADO

Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	11584	11612	11969	12050	11430	11510
Peso del Molde	gr.	6715	6716	7527	7528	7094	7095
Peso del Suelo Humedo	gr.	4869	4896	4442	4522	4336	4415
Volumen del Suelo	cc.	2128	2128	2092	2092	2128	2128
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	2.288	2.301	2.123	2.161	2.038	2.075

Capsula No	No	1	2	3	4	5	6
Suelo Humedo + Capsula	gr.	96.00	94.60	102.86	98.95	103.51	110.31
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	88.12	87.25	95.08	90.78	95.10	101.03
Peso del Agua	gr.	7.88	7.35	7.78	8.17	8.41	9.28
Peso de la Capsula	gr.	14.05	13.80	13.71	13.14	13.45	10.33
Peso del Suelo Seco	gr.	74.07	73.45	81.37	77.64	81.65	90.70
% de Humedad	%	10.64%	10.01%	9.56%	10.52%	10.30%	10.23%
Promedio de Humedad	%	10.32%		10.04%		10.27%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	2.074		1.929		1.848	

**EXPANSIÓN**

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion		Dial	Expansion		Dial	Expansion	
				mm	%		mm	%		mm	%
13/11/2017	8:53 p.m.	0 h.	24.29	0	0	5.45	0	0	11.46	0	0
16/11/2017	5:26 p.m.	72 h	25.67	1.38	1.2545	7.06	1.612	1.465	13.42	1.96	1.782
17/11/2017	6:26 p.m.	96 h	26.31	1.84	1.6727	7.6	2.15	1.956	13.86	2.4	2.182

**PENETRACIÓN**

Penetración (mm)	Tiempo	Carga Est. (Kg/cm2)	MOLDE No 1				MOLDE No 2				MOLDE No 3			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	00:00		0.00	0.0	0.0		0.0	0.0	0.00		0.00	0.0	0.00	
0.63	00:30		0.33	33.6	1.8		0.27	27.5	1.46		0.13	13.3	0.70	
1.27	01:00		0.98	99.9	5.3		0.86	87.7	4.65		0.43	43.8	2.32	
1.91	01:30		1.76	179.4	9.5		1.32	134.6	7.14		0.62	63.2	3.35	
2.54	02:00	70.31	2.55	259.9	13.8		1.62	165.1	8.76		0.86	87.7	4.65	
3.81	03:00		3.63	370.0	19.6		2.27	231.4	12.27		1.14	116.2	6.16	
5.09	04:00	105.00	4.27	435.27	23.1		2.98	303.8	16.11		1.34	136.6	7.24	
6.35	05:00		4.88	497.5	26.38		3.40	346.6	18.38		1.53	156.0	8.27	
7.62	06:00		5.22	532.1	28.22		3.90	397.6	21.08		1.69	172.3	9.14	
8.89	07:00		6.11	622.8	33.03		4.37	445.5	23.62		1.88	191.6	10.16	
10.16	08:00													

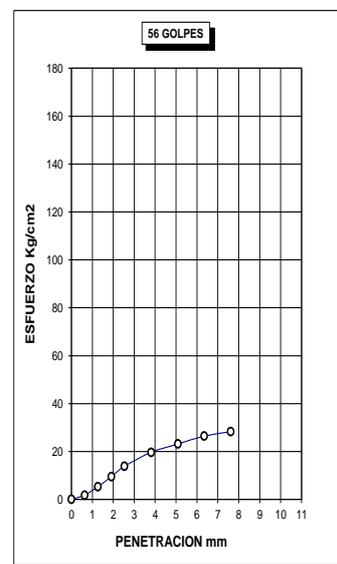
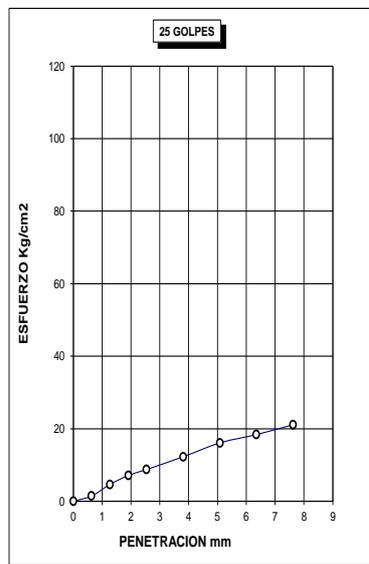
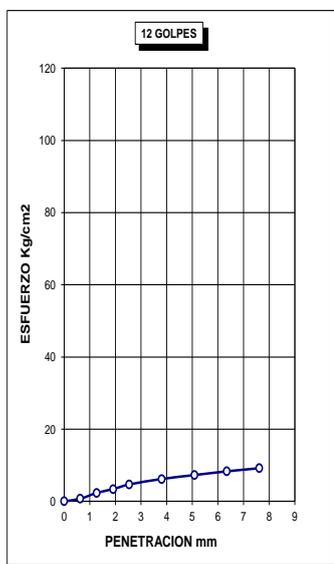
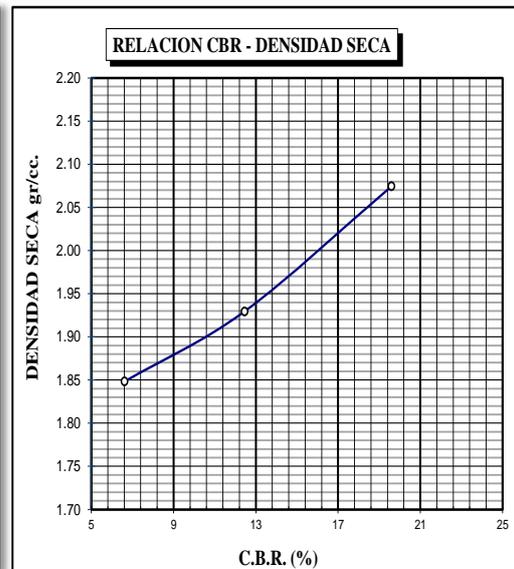
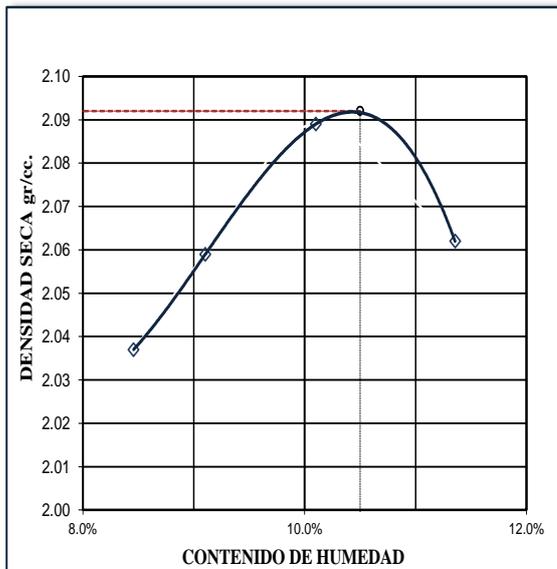


**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

PROYECTO	MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	METODO DE COMPACTACION ASTM D1557-91	A
		MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cc.)	2.092
SOLICITADO	: HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	HUMEDAD OPTIMA (%)	10.50%
		CBR AL 100% DE M.D.S. (%)	20%
UBICACIÓN	CHUPA-HUANCANE-PUNO	CBR AL 95% DE M.D.S. (%)	16%
FECHA	13 DE NOVIEMBRE DEL 2017		
MUESTRA	SUELO 100%	EMBEBIDO	4 DIAS





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE PROYECTO : Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO  SOLICITANTE: HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE LUGAR : CHUPA-HUANCANE-PUNO FECHA : 18/11/2017	MUESTRA : S90/CV15/C5  PROFUNDIDAD : PROGRESIVA :
--	--

MOLDE No	1	2	3
No DE CAPAS	5	5	5
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	56	25	12
CONDICIONES DE LA MUESTRA	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR

Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	11849	12037	11614	11645	10830	10856
Peso del Molde	gr.	7765	7765	7527	7528	7094	7094
Peso del Suelo Humedo	gr.	4084	4272	4087	4117	3736	3762
Volumen del Suelo	cc.	2023	2023	2092	2092	2128	2128
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	2.019	2.112	1.953	1.968	1.756	1.768

Capsula No	No	1	2	3	4	5	6
Suelo Humedo + Capsula	gr.	95.59	94.51	103.84	99.12	95.83	110.31
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	88.12	87.25	95.08	90.78	89.00	101.03
Peso del Agua	gr.	7.47	7.26	8.76	8.34	6.83	9.28
Peso de la Capsula	gr.	14.05	13.80	13.71	13.14	21.61	10.33
Peso del Suelo Seco	gr.	74.07	73.45	81.37	77.64	67.39	90.70
% de Humedad	%	10.09%	9.88%	10.77%	10.74%	10.14%	10.23%
Promedio de Humedad	%	9.98%		10.75%		10.18%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.836		1.764		1.594	

**EXPANSIÓN**

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion		Dial	Expansion		Dial	Expansion	
				mm	%		mm	%		mm	%
18/09/2017	8:53 p.m.	0 h.	34.29	0	0	15.45	0	0	11.46	0	0
21/09/2017	5:26 p.m.	72 h	34.38	0.09	0.08182	15.92	0.472	0.429	12.06	0.6	0.545
22/09/2017	5:26 p.m.	96 h	34.44	0.15	0.13636	16.04	0.59	0.538	12.25	0.79	0.718

**PENETRACIÓN**

Penetración (mm)	Tiempo	Carga Est. (Kg/cm2)	MOLDE No 1				MOLDE No 2				MOLDE No 3			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	0.00		0.00	0.0	0.0		0.0	0.0	0.00		0.00	0.0	0.00	
0.63	6.83		6.83	696.2	36.9		4.25	433.2	22.97		1.83	186.5	9.89	
1.27	10.50		10.50	1070.3	56.8		7.08	721.7	38.27		2.61	266.1	14.11	
1.91	12.35		12.35	1258.9	66.8		9.32	950.1	50.38		2.81	286.4	15.19	
2.54	13.39	70.31	13.39	1364.9	72.4		10.47	1067.3	56.60		2.84	289.5	15.35	
3.81	15.16		15.16	1545.4	82.0		11.72	1194.7	63.36		3.02	307.8	16.33	
5.09	16.50	105.00	16.50	1681.96	89.2		12.25	1248.7	66.22		3.19	325.2	17.24	
6.35	18.36		18.36	1871.6	99.25		12.75	1299.7	68.92		3.32	338.4	17.95	
7.62	20.05		20.05	2043.8	108.39		13.11	1336.4	70.87		3.51	357.8	18.97	
8.89	20.90		20.90	2130.5	112.98		13.97	1424.1	75.52		3.68	375.1	19.89	
10.16	08:00													

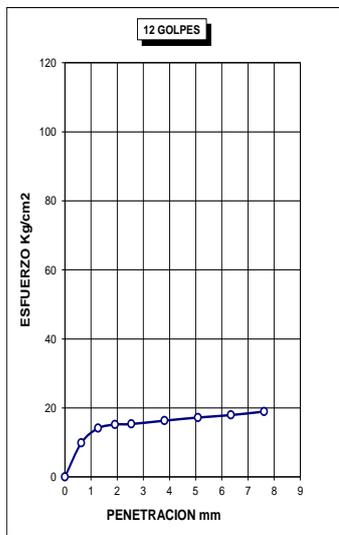
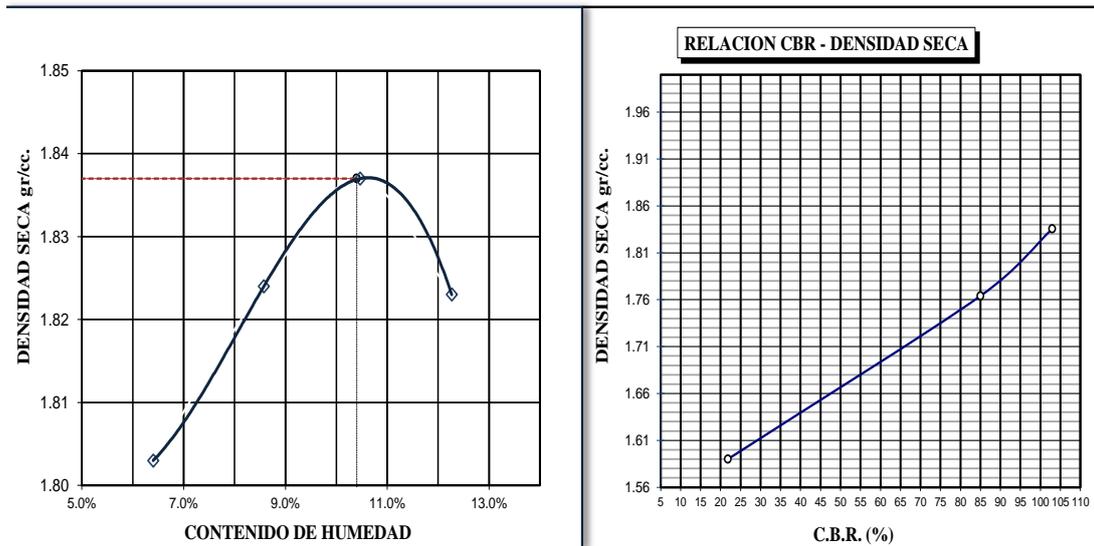


**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**

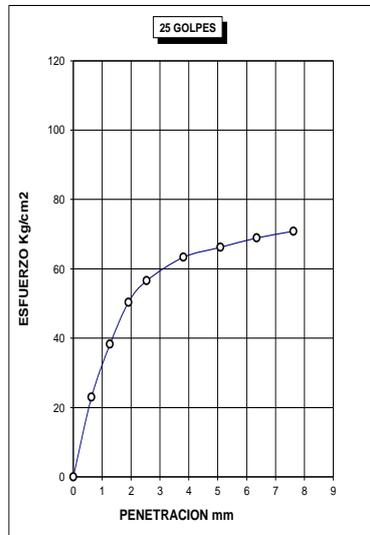


**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

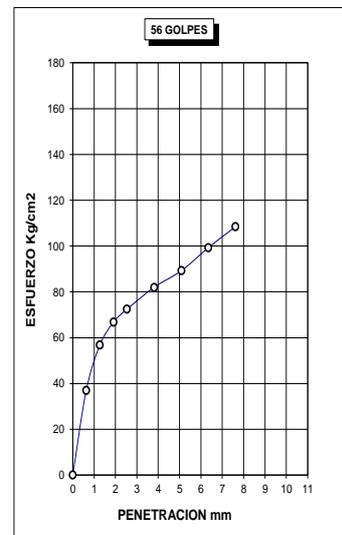
PROYECTO	MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	METODO DE COMPACTACION ASTM D1557-91		A
		MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cc.)		1.837
SOLICITADO	HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	HUMEDAD OPTIMA (%)		10.40%
		CBR AL 100% DE M.D.S. (%)		103%
UBICACIÓN	CHUPA-HUANCANE-PUNO	CBR AL 95% DE M.D.S. (%)		80%
FECHA	18 DE NOVIEMBRE DEL 2017	MUESTRA	S90/CV5/C5	
		EMBEBIDO	4 DIAS	



CBR = 22%



CBR = 80%



CBR = 103%



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

<b>PROYECTO :</b> MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	<b>MUESTRA :</b> S80/CV15/C5
<b>SOLICITANTE:</b> HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	<b>PROFUNDIDAD :</b>
<b>LUGAR :</b> CHUPA-HUANCANE-PUNO	<b>PROGRESIVA :</b>
<b>FECHA :</b> 18/11/2017	

<b>MOLDE No</b>	1		2		3	
<b>No DE CAPAS</b>	5		5		5	
<b>NUMERO DE GOLPES POR CAPA</b>	56		25		12	
<b>CONDICIONES DE LA MUESTRA</b>	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR	SATURADO

<b>Peso Suelo Humedo + Molde</b>	gr.	11245	11380	11382	11680	10672	11300
<b>Peso del Molde</b>	gr.	7187	7187	7527	7528	7094	7095
<b>Peso del Suelo Humedo</b>	gr.	4058	4193	3855	4152	3578	4205
<b>Volumen del Suelo</b>	cc.	2123	2123	2092	2092	2128	2128
<b>Densidad del Suelo Humedo</b>	gr/cc.	1.912	1.975	1.843	1.985	1.682	1.976

<b>Capsula No</b>	No	1	2	3	4	5	6
<b>Suelo Humedo + Capsula</b>	gr.	95.59	94.51	103.84	99.12	103.51	110.31
<b>Peso del Suelo Seco + Capsula</b>	gr.	88.12	87.25	95.08	90.78	95.10	101.03
<b>Peso del Agua</b>	gr.	7.47	7.26	8.76	8.34	8.41	9.28
<b>Peso de la Capsula</b>	gr.	14.05	13.80	13.71	13.14	13.45	10.33
<b>Peso del Suelo Seco</b>	gr.	74.07	73.45	81.37	77.64	81.65	90.70
<b>% de Humedad</b>	%	10.09%	9.88%	10.77%	10.74%	10.30%	10.23%
<b>Promedio de Humedad</b>	%	9.98%		10.75%		10.27%	
<b>Densidad del Suelo Seco</b>	gr/cc.	1.738		1.664		1.525	

**EXPANSIÓN**

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion		Dial	Expansion		Dial	Expansion	
				mm	%		mm	%		mm	%
18/11/2017	8:53 p. m.	0 h.	24.29	0	0	5.45	0	0	11.46	0	0
19/11/2017	5:26 p. m.	24 h.	24.36	0.07	0.0636	5.88	0.432	0.393	11.96	0.5	0.455
22/11/2017	5.00 p.m.	96h	24.43	0.14	0.1273	6.15	0.70	0.638	12.24	0.78	0.709

**PENETRACIÓN**

Penetración (mm)	Tiempo	Carga Est. (Kg/cm2)	MOLDE No 1				MOLDE No 2				MOLDE No 3			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	0:00		0.00	0.0	0.0		0.0	0.0	0.00		0.00	0.0	0.00	
0.63	0:30		5.68	579.0	30.7		3.96	403.7	20.40		0.80	81.5	4.32	
1.27	1:00		12.78	1302.8	69.1		10.56	1076.5	54.41		1.80	183.5	9.73	
1.91	1:30		15.32	1561.7	82.8		12.05	1228.3	62.09		2.89	294.6	15.62	
2.54	2:00	70.31	15.99	1630.0	86.4		13.16	1341.5	67.81		3.76	383.3	20.33	
3.81	3:00		17.13	1746.2	92.6		14.08	1435.3	72.55		4.97	506.6	26.87	
5.09	4:00	105.00	19.00	1936.80	102.7		14.77	1505.6	76.11		5.84	595.3	31.57	
6.35	5:00		21.45	2186.5	115.95		15.42	1571.9	79.46		6.72	685.0	36.33	
7.62	6:00		23.44	2389.4	126.71		16.02	1633.0	82.55		7.29	743.1	39.41	
8.89	7:00		25.87	2637.1	139.85		16.86	1718.7	86.88		7.81	796.1	42.22	
10.16	8:00													



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

<b>PROYECTO :</b> MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	<b>MUESTRA :</b> S80/CV15/C5
<b>SOLICITANTE:</b> HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	<b>PROFUNDIDAD :</b>
<b>LUGAR :</b> CHUPA-HUANCANE-PUNO	<b>PROGRESIVA :</b>
<b>FECHA :</b> 18/11/2017	

<b>MOLDE No</b>	1	2	3
<b>No DE CAPAS</b>	5	5	5
<b>NUMERO DE GOLPES POR CAPA</b>	56	25	12
<b>CONDICIONES DE LA MUESTRA</b>	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR
	SATURADO	SATURADO	SATURADO

<b>Peso Suelo Humedo + Molde</b>	gr.	11245	11380	11382	11680	10672	11300
<b>Peso del Molde</b>	gr.	7187	7187	7527	7528	7094	7095
<b>Peso del Suelo Humedo</b>	gr.	4058	4193	3855	4152	3578	4205
<b>Volumen del Suelo</b>	cc.	2123	2123	2092	2092	2128	2128
<b>Densidad del Suelo Humedo</b>	gr/cc.	1.912	1.975	1.843	1.985	1.682	1.976

<b>Capsula No</b>	No	1	2	3	4	5	6
<b>Suelo Humedo + Capsula</b>	gr.	95.59	94.51	103.84	99.12	103.51	110.31
<b>Peso del Suelo Seco + Capsula</b>	gr.	88.12	87.25	95.08	90.78	95.10	101.03
<b>Peso del Agua</b>	gr.	7.47	7.26	8.76	8.34	8.41	9.28
<b>Peso de la Capsula</b>	gr.	14.05	13.80	13.71	13.14	13.45	10.33
<b>Peso del Suelo Seco</b>	gr.	74.07	73.45	81.37	77.64	81.65	90.70
<b>% de Humedad</b>	%	10.09%	9.88%	10.77%	10.74%	10.30%	10.23%
<b>Promedio de Humedad</b>	%	<b>9.98%</b>		<b>10.75%</b>		<b>10.27%</b>	
<b>Densidad del Suelo Seco</b>	gr/cc.	<b>1.738</b>		<b>1.664</b>		<b>1.525</b>	

**EXPANSIÓN**

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion		Dial	Expansion		Dial	Expansion	
				mm	%		mm	%		mm	%
18/11/2017	8:53 p. m.	0 h.	24.29	0	0	5.45	0	0	11.46	0	0
19/11/2017	5:26 p. m.	24 h.	24.36	0.07	0.0636	5.88	0.432	0.393	11.96	0.5	0.455
22/11/2017	5.00 p.m.	96h	24.43	0.14	0.1273	6.15	0.70	0.638	12.24	0.78	0.709

**PENETRACIÓN**

Penetración (mm)	Tiempo	Carga Est. (Kg/cm2)	MOLDE No 1				MOLDE No 2				MOLDE No 3			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	0:00		0.00	0.0	0.0		0.0	0.0	0.00		0.00	0.0	0.00	
0.63	0:30		5.68	579.0	30.7		3.96	403.7	20.40		0.80	81.5	4.32	
1.27	1:00		12.78	1302.8	69.1		10.56	1076.5	54.41		1.80	183.5	9.73	
1.91	1:30		15.32	1561.7	82.8		12.05	1228.3	62.09		2.89	294.6	15.62	
2.54	2:00	70.31	15.99	1630.0	86.4		13.16	1341.5	67.81		3.76	383.3	20.33	
3.81	3:00		17.13	1746.2	92.6		14.08	1435.3	72.55		4.97	506.6	26.87	
5.09	4:00	105.00	19.00	1936.80	102.7		14.77	1505.6	76.11		5.84	595.3	31.57	
6.35	5:00		21.45	2186.5	115.95		15.42	1571.9	79.46		6.72	685.0	36.33	
7.62	6:00		23.44	2389.4	126.71		16.02	1633.0	82.55		7.29	743.1	39.41	
8.89	7:00		25.87	2637.1	139.85		16.86	1718.7	86.88		7.81	796.1	42.22	
10.16	8:00													

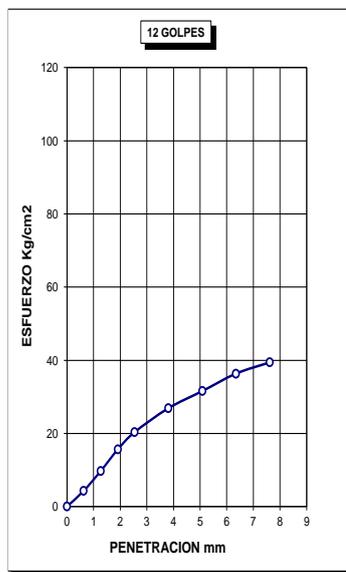
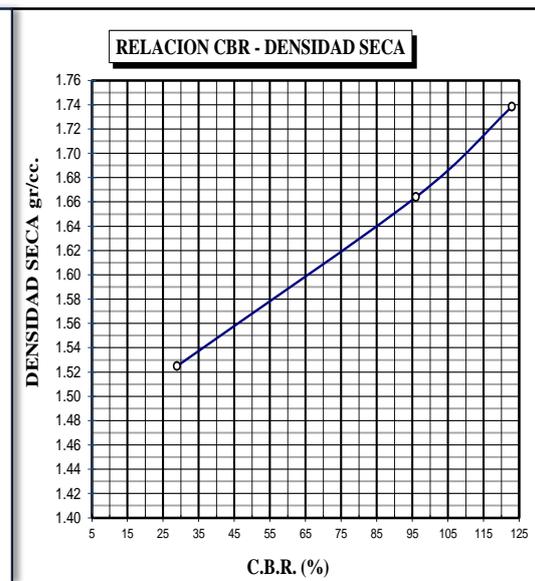
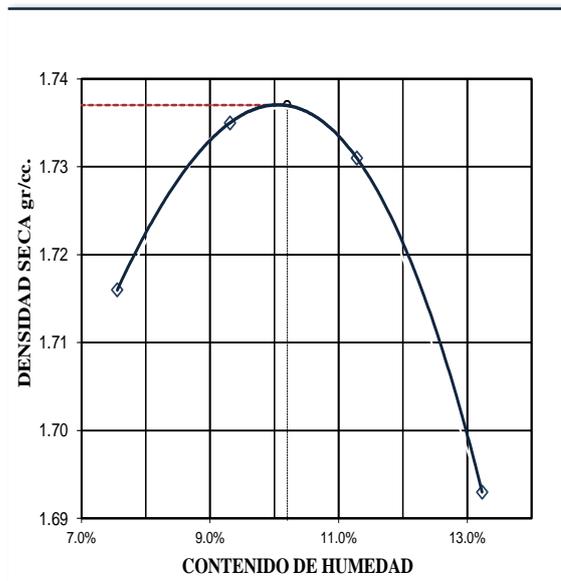


**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**

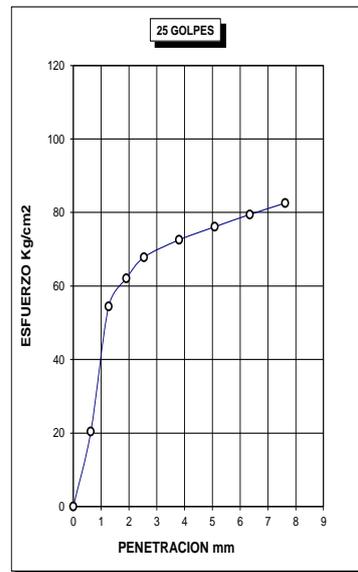


**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)  
 ASTM D 1883**

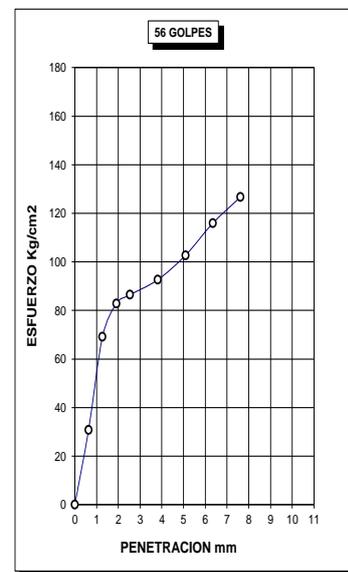
<b>PROYECTO</b>	MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	<b>METODO DE COMPACTACION ASTM D1557-91</b>		A
		<b>MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cc.)</b>		1.737
<b>SOLICITADO</b>	HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	<b>HUMEDAD OPTIMA (%)</b>		10.20%
		<b>CBR AL 100% DE M.D.S. (%)</b>		123%
<b>UBICACIÓN</b>	CHUPA-HUANCANE-PUNO	<b>CBR AL 95% DE M.D.S. (%)</b>		89%
<b>FECHA</b>	18 DE NOVIEMBRE DEL 2017	<b>MUESTRA</b>	S80/CV15/C5	
		<b>EMBEBIDO</b>	4 DIAS	



CBR = 29%



CBR = 96%



CBR = 123%



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

<b>PROYECTO :</b> MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO <b>SOLICITANTE:</b> HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE <b>LUGAR :</b> CHUPA-HUANCANE-PUNO <b>FECHA :</b> 18/11/2017	<b>MUESTRA :</b> S70/CV15/C5
---	------------------------------

<b>MOLDE No</b>	1	2	3
<b>No DE CAPAS</b>	5	5	5
<b>NUMERO DE GOLPES POR CAPA</b>	56	25	12
<b>CONDICIONES DE LA MUESTRA</b>	SIN SATURAR	SATURADO	SIN SATURAR

<b>Peso Suelo Humedo + Molde</b>	gr.	10528	10590	10372	10396	10150	10178
<b>Peso del Molde</b>	gr.	6687	6687	6870	6871	6790	6791
<b>Peso del Suelo Humedo</b>	gr.	3841	3903	3502	3525	3360	3387
<b>Volumen del Suelo</b>	cc.	2120	2120	2018	2018	2122	2122
<b>Densidad del Suelo Humedo</b>	gr/cc.	1.812	1.841	1.736	1.747	1.583	1.596

<b>Capsula No</b>	No	1	2	3	4	5	6
<b>Suelo Humedo + Capsula</b>	gr.	97.49	95.07	111.08	114.73	94.06	100.01
<b>Peso del Suelo Seco + Capsula</b>	gr.	92.15	90.39	104.98	108.20	89.10	95.10
<b>Peso del Agua</b>	gr.	5.34	4.68	6.10	6.53	4.96	4.91
<b>Peso de la Capsula</b>	gr.	13.88	22.00	17.77	16.98	19.50	21.61
<b>Peso del Suelo Seco</b>	gr.	78.27	68.39	87.21	91.22	69.60	73.49
<b>% de Humedad</b>	%	6.82%	6.84%	6.99%	7.16%	7.13%	6.68%
<b>Promedio de Humedad</b>	%	<b>6.83%</b>		<b>7.08%</b>		<b>6.90%</b>	
<b>Densidad del Suelo Seco</b>	gr/cc.	<b>1.696</b>		<b>1.621</b>		<b>1.481</b>	

**EXPANSIÓN**

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion		Dial	Expansion		Dial	Expansion	
				mm	%		mm	%		mm	%
18/11/2017	8:53 p.m.	0 h.	24.54	0	0	19.185	0	0	11.59	0	0
21/11/2017	5:26 p.m.	72 h.	25.1	0.56	0.5091	19.85	0.665	0.605	12.46	0.87	0.791
22/11/2017	5.00PM	96 h	25.39	0.85	0.7727	20.18	0.995	0.905	12.84	1.25	1.136

**PENETRACIÓN**

Penetración mm	Tiempo	Carga Est.	MOLDE No 1				MOLDE No 2				MOLDE No 3			
			Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.	Dial	Kg	Kg/cm2	Correc.
0	00:00		0.00	0.0	0.0		0.00	0.0	0.00		0.00	0.0	0.00	
0.63	00:30		0.81	82.6	4.4		0.75	76.5	3.86		0.56	56.9	2.88	
1.27	01:00		2.56	261.0	13.8		2.06	210.0	10.61		0.95	96.8	4.90	
1.91	01:30		6.30	642.2	34.1		5.92	603.5	30.50		1.53	156.0	7.88	
2.54	02:00	70.31	10.50	1070.3	56.8		9.36	954.1	48.23		1.98	201.8	10.20	
3.81	03:00		15.48	1578.0	83.7		13.75	1401.6	70.85		2.74	279.3	14.12	
5.09	04:00	105.00	18.59	1895.01	100.5		16.84	1716.6	86.77		3.24	330.3	16.69	
6.35	05:00		20.14	2053.0	108.87		17.74	1808.4	91.41		3.82	389.4	19.68	
7.62	06:00		21.60	2201.8	116.76		18.26	1861.4	94.09		4.18	426.1	21.54	
8.89	07:00		23.90	2436.3	129.20		20.50	2089.7	105.63		4.97	506.6	25.6	
10.16	08:00													

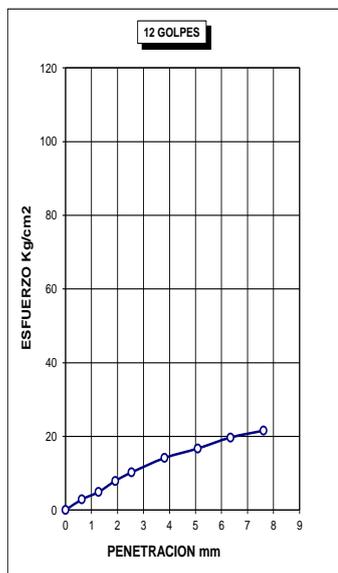
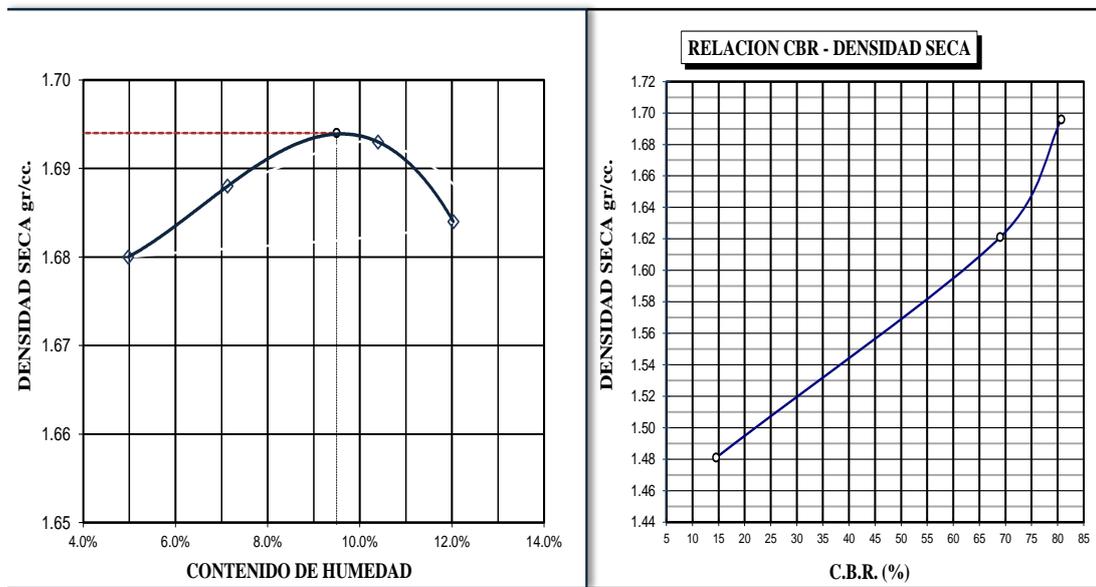


**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**

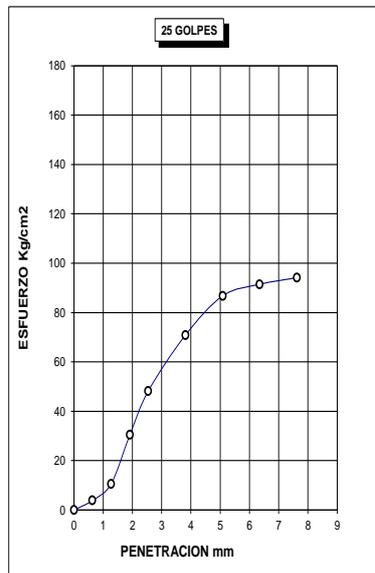


**ENSAYO CALIFORNIA BERING RATIO (CBR)**  
**ASTM D 1883**

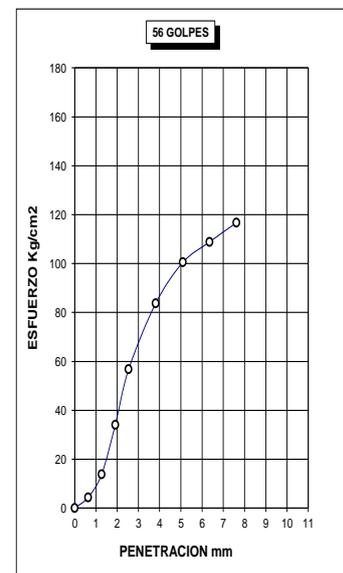
PROYECTO	: MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIO HUANCANE - CHUPA - PUNO	METODO DE COMPACTACION ASTM D1557-91	A
		MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cc.)	1.694
SOLICITADO	: HUANCOILLO HUMPIRI YUNIOR JOSE	HUMEDAD OPTIMA (%)	9.50%
		CBR AL 100% DE M.D.S. (%)	81%
UBICACIÓN	CHUPA-HUANCANE-PUNO	CBR AL 95% DE M.D.S. (%)	65%
FECHA	: 18 DE NOVIEMBRE DEL 2017.	MUESTRA	S70/CV25/C5
		EMBEBIDO	4 DIAS



CBR = 15%



CBR = 69%



CBR = 81%

# Anexo 2

## Costo de la ceniza Volante

The screenshot shows an Outlook.com email interface. The browser address bar displays the URL: <https://col1125.mail.live.com/?tid=cmOXRIAueH5BGJjwAhWtfC0A2&fid=finbox&ftid=0&paid=cmqsO7OPmE5BGh8wAjeQWqg2&pad=2>. The email is titled "RE: Desde UNA-Puno" and is from "Elmer Sanchez (Elmer.Sanchez@enersur.com.pe)" to "Eliud J. H. C.". The email content discusses the cost of cement (0.5 dollars/ton) and the type of coal used (bituminoso) by the only cement company in Lima. It mentions a purchase of 60,000 tons of cement and requests a letter to leave the university and contact Jairo Cantillo, Superintendent of Operations II.

**RE: Desde UNA-Puno**

Elmer Sanchez (Elmer.Sanchez@enersur.com.pe) [Agregar a contactos 19/12/2014](#)

Para: Eliud J. H. C. ▾

Estimado Eliud

Costo de ceniza: 0.5 dólares / tonelada

El tipo de carbón es bituminoso

La única empresa que compró es Cementos Lima

Tenemos más de 60,000 toneladas de ceniza

Si quieren más ceniza, la carta debe salir de la Universidad y dirigir a:

**Jairo Cantillo, Superintendente de operaciones Ilo**

© 2015 Microsoft Términos Privacidad y cookies Desarrolladores Español



EMPRESA DE TRANSPORTES  
**SANKY** S.C.R.L.  
TRANSPORTE Y SERVICIOS GENERALES A NIVEL NACIONAL  
R.U.C. 20452608104



Costización de transporte

Cliente: Elend Jonatan  
Huarancca Palizaya  
Ruta : Ilo- Puno

Mercaderia: 20tm. de Ceniza  
Volante.

Costo : S/ 4.500.00 Incluido IGV

Tacna 17 de Diciembre 2014



**OFIC. PRINCIPAL LIMA**

Cal. Humboldt Alexander N° 563 - La Victoria - Lima  
Telf: 423-5312/423-2726 fax 424-1230  
Mex : 834 6723/410 0905  
Rpm:# 634662 Rpc:9866-08827

**SUCURSALES**

• **ICA:** Av. Ayabaca N° 1004 Telf: 056-224050 Mex: 838 4733 / 402 7790  
• **MOLLENO:** Calle Comercio N° 904 Telf: 054-781828

• **MO:** Miramar N° T-22 parte prima Telf : 053-245860  
• **TACNA:** Av. Industrial N° 240 Telf: 052-245860 Mex: 411 1580

web: [www.sanky.com](http://www.sanky.com) e-mail: [ventas@sanky.com](mailto:ventas@sanky.com) // [transanky@hotmail.com](mailto:transanky@hotmail.com)

# Anexo 3

## Costo de la Cal

Homecenter | Constructor

Seguimiento de compra | **Venta Telefónica 615 - 6002** | Servicio al Cliente 419 - 2000 | Tiendas



¿Qué te podemos ayudar a encontrar hoy?



☰ Categorías

🔧 Campañas e Ideas

Tienda seleccionada: **Arequipa**

[Inicia sesión](#) / [Registro](#)

[Volver a resultados](#) | [Sodimac.com.pe](#) > [Materiales de Construcción](#) > [Cemento y Complementos](#) > [Aditivos](#) > [Topex Cal obra 20 kg](#)

## Cal obra 20 kg Topex

SKU 20779-9 | [f](#) [t](#) [i](#)



📷 Imagen

📌 Precio corresponde a tienda **Arequipa**.  
El precio puede cambiar al modificar la ciudad de despacho o retiro.



S/ **12.90** C/U

Acumulas: 12 CMR Puntos

Cantidad

1



**Agregar al carro** 🛒

[Agregar a mi lista](#)

REVISLA DISPONIBILIDAD DE ESTE PRODUCTO AQUI:

🚚 Despacho a domicilio

[Ver opciones](#)

🏠 Retiro en tienda

[Ver opciones](#)

🏪 Disponibilidad en tiendas

[Ver tiendas](#)

# Anexo 4

## Análisis Químico de la Ceniza Volante

# Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado  
Arequipa Perú / Apartado 2102

Teléfono (054) 443294 Fax: (054) 444582  
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

## INFORME DE ENSAYO LAS-15-00707

Fecha de emisión: 06/02/2015  
Pág.: 1/1

**Señores:** Eliud Jonatan Huarancca Calizaya  
**Dirección:** Jr 4 de Octubre 234 Int. 02 Barrio 2 de Mayo - Puno  
**Atención:** Eliud Jonatan Huarancca Calizaya  
**Recepción:** 24/01/2015  
**Realización:** 24/01/2015

**Método de ensayo aplicado**

- \*700 Determinación de humedad en minerales
- \*590 Método de ensayo para Fósforo total por fotometría
- \*567 Método de Ensayo para Sulfatos por Digestión Específica - Fotometría
- \*592 Método de Ensayo para Rocas Fusión alcalina (SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)
- \*582 Determinación de pérdidas de calcinación por Gravimetría (LOI)

Muestra #	Nombre de muestra	Descrip. de muestra	Procedencia de la muestra	*700 H <sub>2</sub> O %	*590 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ppm	*567 SO <sub>4</sub> = ppm	SO <sub>3</sub> ppm	*592 SiO <sub>2</sub> %	*592 CaO %	*592 MgO %	*592 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	*592 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	*592 Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	*592 Na <sub>2</sub> O %	*592 K <sub>2</sub> O %	*582 LOI %
MN15000768	CENIZA VOLANTE CLASE F	CENIZA	Central Termoeléctrica Ilo 21	4,46	1934	8400	7000	50,18	0,17	1,37	15,29	8,18	0,17	8,44	2,85	3,91

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Sixto Vicerche Juárez Neira  
Gerente General  
Ing. Químico CIP 19474

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados solo están relacionados a la muestra ensayada.

# Anexo 5

Ficha de datos de seguridad de la ceniza  
volante otorgado por el fabricante

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

### SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN

**Nombre del Producto:** Ceniza volante y ceniza de fondo(escoria)

**Fabricante:** GDF SUEZ Enersur Central Térmica Ilo21

Central Termoeléctrica Ilo21, Km 120.5 Carretera Costanera Sur Ilo Tacna, Departamento de Moquegua, República de Perú, Tel 51 053 584030.

**Uso:** Se utiliza como componente de productos cementeros y hormigón. También se utiliza para la compactación de suelos y pavimentos de asfalto y como mejorador de suelos pobres en minerales.

### SECCIÓN 2: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

<p><b>Advertencia</b></p> 	<p><b>Irritante:</b> Causa irritación en los ojos, la piel y por inhalación.</p> <p>Tóxico es nocivo por inhalación (Contiene sílice cristalina)</p>	
<b>Posibles efectos en la salud</b>		
<b>Contacto ocular:</b>	El polvo aéreo puede causar irritación. El contacto ocular con grandes cantidades puede causar irritación ocular moderada.	
<b>Contacto dérmico:</b>	En contacto con la piel podría causar piel seca, molestias e irritación.	
<b>Inhalación (efectos agudos):</b>	La respiración de la ceniza puede causar irritación en la nariz, la garganta o los pulmones, e incluso asfixia según el grado de exposición.	
<b>Inhalación (efectos crónicos):</b>	El riesgo de sufrir lesiones depende de la duración y el nivel de exposición.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Silicosis:</u></li> <li>• <u>Tuberculosis:</u></li> </ul>	<p>Este producto contiene sílice. La inhalación prolongada o repetida de la sílice puede causar silicosis, una enfermedad pulmonar.</p> <p>La sílice aumenta el riesgo de contraer tuberculosis.</p>	
No ingerir las cenizas. La ingestión de grandes cantidades puede		

**Ingestión:** provocar efectos fuertes en el travto digestivo.

**SECCIÓN 3: COMPOSICIÓN**

- SiO<sub>2</sub>: 18 a 66%
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 15 a 32%
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2 a 21%
- CaO: 0.5 a 23%
- MgO: 0.3 a 11.5%
- Na<sub>2</sub>O: 0.1 a 3.0%
- K<sub>2</sub>O: 0.3 a 2.0%
- TiO<sub>2</sub>: 0.6 a 1.7%
- SO<sub>3</sub>: 0.1 a 16%
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 0.05 a 1.0%

**SECCIÓN 4: PRIMEROS AUXILIOS**

<b>Contacto Ocular:</b>	Lavar con abundante agua por 15 minutos, levantando los parpados, si se mantienen partículas no retirarlas, vendar ambos ojos y buscar atención médica.
<b>Contacto Dérmico:</b>	Enjuagar la parte afectada con agua y con jabón neutro para la piel, si se tiene molestias en la piel acudir al médico.
<b>Inhalación:</b>	Llevar al afectado a un área despejada y libre de los polvos. Obtener atención médica si persisten las molestias respiratorias.
<b>Ingestión:</b>	No provocar vomito. Si el afectado esta consiente, beber abúndate agua e ir inmediatamente al Centro de Salud más cercano.

**SECCIÓN 5: MEDIDAS CONTRA INCENDIO**

<b>Punto de inflamación:</b>	No es combustible
<b>Medios de extinción:</b>	No aplica.

**SECCIÓN 6: MEDIDAS CONTRA DERRAMES**

<b>Generalidades:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delimitar el área.</li> <li>• Evitar el levantamiento del polvo de ceniza humedeciendo con agua.</li> <li>• Utilizar EPP según sección 8.</li> </ul>
-----------------------	---

- pH en agua: 6.0 - 7.5
- Solubilidad en agua: Insoluble
- Viscosidad: Ninguna – Sólido

## SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

<b>Estabilidad:</b>	Estable
<b>Incompatibilidad:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ninguna</li> </ul>

## SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Consulte al médico de tener alguna exposición tipificada en los primeros auxilios, en la sección 4.

## SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Consulte la legislación nacional para la utilización de este producto.

## SECCIÓN 13: DISPOSICIÓN

Consulte la legislación nacional para disponer este producto.

De acuerdo al DS 057-2004-PCM Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos, la ceniza de carbón de plantas termoeléctricas no es considerada como residuo peligroso

De acuerdo al Convenio de Basilea del 22 de marzo del 1989 y puesto en marcha desde el 5 de mayo del 1992, la ceniza de carbón de plantas termoeléctricas no está considerada como en la categoría de desechos que se deben controlar (Anexo I), ni en la categoría de desechos que requieran una consideración especial (Anexo III)

## SECCIÓN 14: TRANSPORTE

No es considerado como material peligroso. En caso de derrame durante el transporte seguir lo indicado en la sección 6

# Anexo 6

Constancia de uso de Equipos de  
Laboratorio de Mecánica de Suelos Y  
materiales



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

**CONSTANCIA DE USO DE EQUIPOS DE LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES**

**EL QUE SUSCRIBE JEFE DE LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES DE LA FICA**

**Hace constar:**

Que el tesista, Bach: **YUNIOR JOSE HUANCOILLO HUMPIRI**, hizo uso de los equipos del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales - FICA, para realizar los ensayos requeridos para su proyecto de Tesis: **"MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE Y CAL PARA SU USO COMO PAVIMENTO A NIVEL DE AFIRMADO EN LA CARRETERA DESVIÓ HUANCANE - CHUPA - PUNO"**. Conducente a la obtención del Título profesional de Ingeniero Civil.

Los ensayos que realizo son los siguientes.

Nº	ENSAYOS	CANTIDAD	U.M.
1	Análisis Granulométrico Por Lavado	01	Und
2	Limites de Consistencia	04	Und
3	Ensayo de Proctor	04	Und
4	Ensayo C.B.R.	04	Und

*Los resultados obtenidos, de los ensayos, no son responsabilidad del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales.*

Se le expide la presente constancia a solicitud escrita del interesado, para adjuntar en su proyecto de Tesis.

Puno, C. U. 27 de Diciembre de 2017.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
 Facultad de Ing. Civil y Arquitectura  
 Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales

Ingº JOSE L. CUXIPA ARAPA  
 Reg. CIP. Nº 57739  
 Jefe de Laboratorio

# Anexo 7

Guía de Remisión – Remitente emitida  
por Engie



CARRETERA COSTANERA SUR KM. 120.5  
 Z.I. PAMPA DE PALO ILO - ILO - MOQUEGUA.  
 OFICINA PRINCIPAL: AV. REPUBLICA DE PANAMA  
 NRO. 3490 URB. CORPAC SAN ISIDRO - LIMA- LIMA.  
 TELF.: 616-7979 FAX: 616-7929 .

**R.U.C. N° 20333363900**  
**GUIA DE REMISION - REMITENTE**  
**N° 005 - 0023626**

DESTINATARIO: **YUNIOR JOSE HUANCOILLO**  
 DIRECCION: **URB. CHANU CHANU PRIMERA ETA G 1 PUNO**  
 R.U.C. / D.N.I. N°: \_\_\_\_\_ FECHA: **26/10/2017**

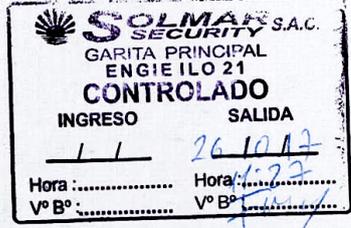
COMPROBANTE DE PAGO  
 TIPO: \_\_\_\_\_ N° \_\_\_\_\_

PUNTO DE LLEGADA: **URB. CHANU CHANU PRIMERA ETA G 1 PUNO**  
 PUNTO DE PARTIDA: **COSTANERA SUR KM.120.5 I L O**

MOTIVO DEL TRASLADO  
 Venta     Compra     Traslado entre establecimientos de una misma empresa     Importaciones     Devoluciones  
 Transformación     Consignación     Traslado zona primaria     Exportaciones     Otros.....

A-18-1-1300922A	RAZON SOCIAL <b>TRANSPORTE PARTICULAR</b>		R.U.C.	DIRECCION		
	FECHA INIC. TRASL. <b>26/10/2017</b>	CHOFER	CONST. INSCRIPCION - MTC	BREVETE	MARCA VEHICULO	PLACA TRACTO

PEDIDO	MATERIAL	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNID.	PESO (KGS)
000001		<b>CUATRO BOLSAS DE CENIZA VOLANTE EN CALIDAD DE MUESTRAS PARA ANALISIS</b>	21	kg aprox	



*Handwritten signature and date: 26/10/17*

OBSERVACIONES:

ALMACEN (REMITENTE)	RECIBI CONFORME	FIRMA TRANSP.	V° B° EMPRESA
---------------------	-----------------	---------------	---------------

SUNAT